

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

**CARACTERIZACIÓN DINÁMICA MEDIANTE
LA IMPLANTACIÓN DE REDES
DISTRIBUIDAS DE SENSORES**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

P R E S E N T A
GREGORIO XAVIER ARGUETA ORTIZ

DIRECTORES DE TESIS:

DR. MANUEL E. RUIZ-SANDOVAL HERNÁNDEZ

DR. RICARDO MARCELÍN JIMÉNEZ

MÉXICO, D. F. MAYO DE 2009

*Dedicado a mi padre y
en memoria de mi madre*

AGRADECIMIENTOS

A mis profesores por otorgarme sus conocimientos y tiempo, en forma sincera y desprendida en la construcción de esta tesis.

Dr. Manuel E. Ruiz-Sandoval Hernández

Dr. Ricardo Marcelín Jiménez

Dr. Arturo Tena Colunga

A mis compañeros por el apoyo brindado.

M. en I. Gerardo Díaz Martínez

M. en I. Artemio Juárez Ángeles

A mi familia, por todo el apoyo brindado hacia mí persona.

Resumen

La instrumentación es una herramienta experimental que permite el monitoreo y caracterización dinámica de las estructuras. Esta es llevada a cabo por medio de instalación de sensores conectados a un sistema de adquisición de datos. Los equipos de adquisición de datos actuales tienen una comunicación alámbrica con los sensores, por lo que instrumentar una estructura representa altos costos de inversión, instalación y mantenimiento. Como una alternativa a este paradigma, este trabajo presenta una propuesta de implantación de redes inalámbricas de sensores a sistemas estructurales. El primer objetivo es la determinación de la ubicación de los sensores sobre la estructura para lograr la mejor caracterización dinámica. El segundo objetivo es la construcción de una red de sensores con las siguientes características: tolerante a fallas, escalable y autoconfigurable.

Abstract

Instrumentation is an experimental tool that allows monitoring and dynamic characterization of structures. It is achieved through the installation of sensors, which are connected to a data acquisition system. Those systems nowadays have a wired sensor communication. This kind of installation implies a high cost of investment, installation and maintenance. As an alternative of this paradigm, this paper presents an implementation with a wireless sensor network for structural systems. The first objective is to determinate the sensor location in the structure to obtain the best dynamic characterization. The second goal is to place a sensor network with the following characteristics: fault tolerant, stable and self-configurable.

Contenido

I Introducción

I.1	Contexto.....	2
I.2	Descripción de la aportación a la ingeniería estructural.....	3
I.3	Objetivos.....	3
I.4	Estructura de la tesis.....	4

II Antecedentes

II.1	Beneficios de la instrumentación estructural.....	6
II.2	Estado actual de la instrumentación de edificaciones.....	7
II.3	Edificaciones instrumentadas en la Ciudad de México.....	8
II.4	Metodologías de instrumentación óptima de sistemas estructurales...	13
II.5	Redes inalámbricas de sensores (RIS).....	14
II.6	Algoritmos distribuidos.....	17
II.7	Sensores inteligentes.....	18

III Ubicación óptima de los sensores

III.1	Enfoque Lim-Gawronski (LG).....	22
III.2	Enfoque Bayard-Hadaegh-Meldrum (BHM).....	23
III.3	Diferencias entre las metodologías de instrumentación LG y BHM.....	25
III.4	Igualación de los modos.....	26

IV Algoritmos distribuidos

IV. 1	Árboles generadores.....	29
IV.2	Construcción de un árbol Depth First Search (DFS).....	30
IV.2.1	Propiedades del algoritmo DFS.....	33
IV.3	Propagación simple.....	34
IV.3.1	Propiedades del algoritmo de propagación simple (PI).....	36

V Instrumentación óptima de un marco plano

V.1 Metodología de instrumentación.....	39
V. 2 Implementación de la metodología de instrumentación.....	40
V. 2.1 Estructuración.....	40
V. 2.2 Propiedades de los elementos estructurales.....	42
V. 2.3 Propiedades intrínsecas de la estructura.....	42
V. 2.4 Parámetros dinámicos.....	45
V. 2.4.1 Parámetros dinámicos E2-33.....	45
V. 2.4.2 Parámetros dinámicos E2-90.....	48
V. 2.4.3 Parámetros dinámicos E2-147.....	50
V. 2.4.4 Parámetros dinámicos E2-204.....	53
V. 2.5 Instrumentación óptima de los marcos planos.....	55
V. 2.5.1 Cálculo de la instrumentación para el marco E2-33.....	55
V. 2.5.2 Cálculo de la instrumentación para el marco E2-90.....	56
V. 2.5.3 Cálculo de la instrumentación para el marco E2-147.....	58
V. 2.5.4 Cálculo de la instrumentación para el marco E2-204.....	60
V.3 Comentarios finales.....	62

VI Conectividad en los sensores y manejo de la información

VI. 1 Redes de comunicación.....	64
VI.1.1 Redes de comunicación implantadas para el marco E2-90.....	64
VI.2 Raíz de árbol generador.....	67
VI.2.1 Raíces propuestas para el marco E2-90.....	67
VI.3 Simulación de la red inalámbrica distribuida.....	70
VI.3.1 Protocolo de sincronía, transporte y agregación (PSTA).....	70
VI.3.2 Variables y parámetros fijos en la simulación.....	72
VI.3.3 Nomenclatura utilizada en la simulación.....	73
VI.4 Simulación.....	74
VI.5 Construcción de las gráficas de información almacenada.....	76
VI.6 Comportamientos particulares en las gráficas de información almacenada.	77
VI.6.1 Comportamiento oscilatorio.....	77
VI.6.2 Comportamiento escalonado.....	78
VI.7 Resultados obtenidos.....	79
VI.8 Árboles generadores y gráficas de información almacenada.....	81

VI.8.1 E2-90-IA, E2-90-IB, E2-90-IC y E2-90-ID.....	82
VI.8.2 E2-90-IIA, E2-90-IIB, E2-90-IIC y E2-90-IIE.....	89
VI.8.3 E2-90-IIIA, E2-90-IIIB, E2-90-IIIC, E2-90-IIID y E2-90-IIIE.....	96
VI.8.4 E2-90-IVA, E2-90-IVB, E2-90-IVC, E2-90-IVD y E2-90-IVE....	104
VI.8.5 E2-90-VA, E2-90-VB, E2-90-VC, E2-90-VD y E2-90-VE.....	112
VI. 9 Caso particular E2-90-III-BIS.....	120
VII Conclusiones	
VII.1 Conclusiones.....	123
VII.2 Trabajos futuros.....	124
Bibliografía	
Bibliografía	125
Apéndice A	
Instrumentación del Marco E2-90	
A.1 Estructuración y propiedades de los elementos estructurales.....	128
A.2 Propiedades intrínsecas de la estructura a estructural.....	129
A.3 Parámetros dinámicos.....	131
A.4 Instrumentación óptima de la estructura	132
Apéndice B	
Nomenclatura	
Nomenclatura.....	138

Lista de Figuras

2.1	Puente de acero US 24, construido en 1947, ubicado en el condado de Pottawatomie, Kansas.....	7
2.2	Localización de puntos de medición para pruebas de vibración ambiental del edificio 49.....	9
2.3	Formas modales obtenidas en el edificio 49.....	10
2.4	Elásticas tridimensionales de la losa de cimentación correspondiente a los modos fundamentales del edificio 49.....	10
2.5	Red de instrumentación sísmica de la Catedral Metropolitana.....	11
2.6	Instrumentación del edificio Telecom.....	12
2.7	Comunicaciones inalámbricas.....	14
2.8	Representación de una red de área local donde los usuarios pueden utilizar conexiones bluetooth ad hoc para interconectar los dispositivos transportados.....	16
2.9	Representación de $G = (V, E)$	18
2.10	Tablilla de sensor.....	19
4.1	Representación de la gráfica $G = (V, E)$	29
4.2	Árboles generadores.....	29
4.3	Construcción de un árbol DFS.....	31
4.4	Algoritmo DFS.....	32
4.5	Relación de descendencia, fijada por el orden de designación.....	33
4.6	Construcción de un árbol PI.....	35
4.7	Algoritmo PI.....	36
5.1	Organigrama del la metodología de instrumentación.....	40
5.2	Estructuración del marco “E2”.....	41
5.3	Discretización con 33 grados de libertad.....	43
5.4	Discretización con 90 grados de libertad.....	43
5.5	Discretización con 147 grados de libertad.....	44
5.6	Discretización con 204 grados de libertad.....	44
5.7	Primer modo de E2-33.....	45
5.8	Segundo modo de E2-33.....	46
5.9	Tercer modo de E2-33.....	46
5.10	Cuarto modo de E2-33.....	47
5.11	Quinto modo de E2-33.....	47
5.12	Primer modo de E2-90.....	48
5.13	Segundo modo de E2-90.....	48
5.14	Tercer modo de E2-90.....	49
5.15	Cuarto modo de E2-90.....	49
5.16	Quinto modo de E2-90.....	50

5.17	Primer modo de E2-147.....	50
5.18	Segundo modo de E2-147.....	51
5.19	Tercer modo de E2-147.....	51
5.20	Cuarto modo de E2-147.....	52
5.21	Quinto modo de E2-147.....	52
5.22	Primer modo de E2-204.....	53
5.23	Segundo modo de E2-204.....	53
5.24	Tercer modo de E2-204.....	54
5.25	Cuarto modo de E2-204.....	54
5.26	Quinto modo de E2-204.....	55
5.27	Arreglo y orientación de los sensores en el marco E2-33.....	56
5.28	Arreglo y orientación de los sensores en el marco E2-90.....	57
5.29	Arreglo y orientación de los sensores en el marco E2-147.....	59
5.30	Arreglo y orientación de los sensores en el marco E2-204.....	61
6.1	Representación esquemática correspondiente a $G = (V, E)$	64
6.2	Red de comunicación I (E2-90-I).....	64
6.3	Red de comunicación II (E2-90-II).....	65
6.4	Red de comunicación III (E2-90-III).....	65
6.5	Red de comunicación IV (E2-90-IV).....	66
6.6	Red de comunicación V (E2-90-V).....	66
6.7	Ubicación A de la raíz del árbol generador (E2-90-A).....	67
6.8	Ubicación B de la raíz de árbol generador (E2-90-B).....	68
6.9	Ubicación C de la raíz de árbol generador (E2-90-C).....	68
6.10	Ubicación D de la raíz de árbol generador (E2-90-D).....	69
6.11	Ubicación E de la raíz de árbol generador (E2-90-E).....	69
6.12	Árboles generadores construidos en la simulación.....	71
6.13	Superposición de capas (DFS-PI).....	72
6.14	Simulación E2-90-VA	75
6.15	Información almacenada en la computadora central durante la simulación E2-90-VA $t = 10$ seg.....	76
6.16	Gráfico de la información almacenada durante la simulación E2-90-VA $t = 10$ seg.....	77
6.17	Gráfico de la información almacenada durante la simulación E2-90-ID $t = 10$ seg	78
6.18	Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 100$ seg.....	79
6.19	Gráfica genérica de información almacenada en la computadora central durante la simulación 400 seg.....	81
6.20	Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IA.....	82
6.21	Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IB.....	83
6.22	Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IC.....	84

6.23	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-ID.....	85
6.24	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 10 seg.....	86
6.25	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 50 seg.....	86
6.26	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 100 seg.....	87
6.27	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 130 seg.....	87
6.28	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 200 seg.....	88
6.29	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 400 seg.....	88
6.30	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-IIA.....	89
6.31	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-IIB.....	90
6.32	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-IIC.....	91
6.33	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-IIIE.....	92
6.34	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 10 seg.....	93
6.35	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 50 seg.....	93
6.36	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 100 seg.....	94
6.37	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 130 seg.....	94
6.38	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 200 seg.....	95
6.39	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 400 seg.....	95
6.40	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-IIIA.....	96
6.41	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-IIIB.....	97
6.42	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-IIIC.....	98
6.43	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-IIID.....	99
6.44	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-IIIE.....	100
6.45	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 10 seg.....	101
6.46	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 50 seg.....	101

6.47	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 100 seg.....	102
6.48	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 130 seg.....	102
6.49	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 200 seg.....	103
6.50	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 400 seg.....	103
6.51	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-IVA.....	104
6.52	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-IVB.....	105
6.53	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-IVC.....	106
6.54	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-IVD.....	107
6.55	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-IVE.....	108
6.56	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 10 seg.....	109
6.57	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 50 seg.....	109
6.58	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 100 seg.....	110
6.59	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 130 seg.....	110
6.60	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 200 seg.....	111
6.61	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 400 seg.....	111
6.62	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-VA.....	112
6.63	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-VB.....	113
6.64	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-VC.....	114
6.65	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-VD.....	115
6.66	Árboles generadores contruidos durante la simulación en E2-90-VE.....	116
6.67	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 10 seg.....	117
6.68	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 50 seg.....	117
6.69	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 100 seg.....	118
6.70	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 130 seg.....	118
6.71	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 200 seg.....	119
6.72	Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 400 seg.....	119
6.73	Redes de comunicación cotejadas.....	120

6.74	Comparación de la información almacenada en la computadora central durante la simulaciones $t = 10$ seg.....	121
A.1	Analogías entre fuerzas y sensores.....	128
A.2	Discretización del marco E2-90.....	128
A.3	Arreglo y orientación de los sensores en el marco E2-90.....	135

Lista de tablas

2.1	Características del acelerómetro ADXL202E.....	20
5.1	Propiedades de los elementos estructurales.....	42
5.2	Nomenclatura del marco “E2”	42
5.3	Aportaciones correspondientes a los S_x , para las primeras cinco formas modales del marco E2-33.....	55
5.4	Aportaciones correspondientes a los S_y , para las primeras cinco formas modales del marco E2-90.....	56
5.5	Aportaciones correspondientes a los S_x , para las primeras cinco formas modales del marco E2-90.....	57
5.6	Aportaciones correspondientes a los S_x , para las primeras cinco formas modales del marco E2-147.....	58
5.7	Aportaciones correspondientes a los S_y , para las primeras cinco formas modales del marco E2-147.....	59
5.8	Aportaciones correspondientes a los S_x , para las primeras cinco formas modales del marco E2-204.....	60
5.9	Aportaciones correspondientes a los S_y , para las primeras cinco formas modales del marco E2-204.....	61
5.10	Porcentaje de la respuesta obtenida para los primeros cinco modos correspondientes a los cuatro arreglos distintos de instrumentación.....	62
5.11	Relación de sensores total & implementados en la instrumentación.....	62
6.1	Combinaciones resultantes de mezclar la red de comunicación y la raíz del árbol generador.....	73
6.2	Nomenclatura utilizada en las simulaciones.....	74
6.3	Secuencia de construcción de los árboles DFS y PI.....	80
6.4	Tiempos de inicialización y terminación de árboles DFS y PI en las simulaciones.....	80

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La intención de esta tesis es explorar la aplicación de la instrumentación inalámbrica a sistemas estructurales. Para desarrollar este tema se proponen como guía los siguientes cuestionamientos:

¿Cuántos sensores deben colocarse en la estructura?, ¿Dónde deben colocarse los sensores?, ¿Cómo se conectan los sensores a una red inalámbrica?, ¿Cómo se envía la información a través de la red de sensores?

En la solución e interacción de las respuestas encontradas a los cuestionamientos planteados anteriormente radica la innovación de éste trabajo. La problemática de esta investigación será abordada en dos etapas.

La primera de ellas consiste en encontrar la ubicación óptima de los sensores colocados en un sistema estructural con la finalidad de registrar las características dinámicas de la estructura, además de cuantificar los sensores que deben ser colocados en la edificación.

El objetivo de la segunda etapa tiene que ver con el flujo adecuado de la información en la red de sensores, además deben de estudiarse otras contingencias existentes como lo son, la escalabilidad de la red y la saturación del sistema, con el propósito de analizar esas problemáticas se realizarán una serie de simulaciones en una plataforma software que brinde un ambiente para la implantación, simulación y análisis de algoritmos distribuidos.

I.1 Contexto

En la ingeniería estructural es de suma importancia conocer el comportamiento que rige a una edificación especial o a un grupo determinado de edificaciones con características similares. Dicho comportamiento puede analizarse mediante el estudio de las características dinámicas de la estructura.

En la actualidad una manera eficaz de monitorear las características dinámicas de los sistemas estructurales es mediante la instrumentación. Sin embargo, el monitoreo de estructuras de carácter civil es poco practicado en México, y en términos generales en el mundo.

Las estructuras que cuentan con un sistemas de monitoreo son escasas. Además, dichos sistemas se integran mediante una red de sensores conectados por medio de cables blindados que envían la información a una computadora. Esto ocasiona costos elevados de instalación y mantenimiento.

Debido a que la instrumentación de estructuras es poco practicada, no existe una metodología de fácil implantación que ayude a cuantificar la cantidad de sensores necesarios en la instrumentación así como la ubicación óptima de los mismos.

Por lo antes mencionado, el objetivo de la primera fase es buscar una metodología de fácil ejecución que permita cuantificar el número de sensores necesarios en la instrumentación, así como la ubicación óptima para cada uno de ellos. Esta metodología estará en función de los parámetros dinámicos que se requiera monitorear, así como de la precisión que se desee obtener.

Conforme la tecnología evoluciona, la manera en que vivimos, trabajamos e interactuamos con el medio ambiente cambiará, y en un futuro no tan lejano los sensores tendrán características inimaginables a precios atractivos. Los sensores serán utilizados en todo tipo de estructuras, caminos, maquinaria, seres vivos, etc. Estos construirán una membrana digital que será capas de percibir una infinidad de fenómenos físicos, químicos, biológicos, entre muchos otros, de gran interés para la humanidad.

La problemática que debe considerarse en el intercambio de información a través de una red de sensores se relaciona con el flujo de información, capacidades técnicas de los sensores, saturación del sistema debida a gran número de procesos y canales de comunicación, problemas de escalabilidad, entre otros.

Con el propósito de estudiar el impacto que tienen las problemáticas mencionadas anteriormente en la implantación de una red de sensores a una estructura de carácter civil, esta investigación tiene como segundo objetivo la simulación de sistemas distribuidos adaptados a una estructura particular. Dicha simulación se realizará en una plataforma software que ofrece un ambiente para la implantación y análisis de algoritmos distribuidos.

Esta tesis busca lograr la implantación de sensores inteligentes capaces de registrar las características dinámicas en edificaciones de carácter civil, así como el desempeño estructural antes, durante y después de ocurrir una acción que ponga en peligro la integridad de la estructura.

Con ello se pretende analizar el comportamiento de la información a través de una red inalámbrica de sensores con características definida.

I.2 Descripción de la aportación a la ingeniería estructural

La mayoría de los seres humanos radica en las grandes ciudades del mundo, esto trae consigo problemas que impactan directamente en la falta de vivienda, vías terrestres, medios de transporte, entre muchos otros. Algunas soluciones aplicadas con el propósito de minimizar la problemáticas son: construcción de grandes rascacielos, nuevas autopistas, etc.

Debido a que en la actualidad no conocemos en su totalidad el comportamiento dinámico de estructuras tan complejas como lo son los grandes rascacielos, puentes, etc., es fundamental el monitoreo de éstas con el propósito de registrar el comportamiento durante su vida útil, en especial durante eventos extraordinarios (sismo, huracanes, atentados terroristas, etc.), que pongan en riesgo la integridad estructural.

La investigación abordada en esta tesis pretende establecer las bases para lograr la instrumentación inalámbrica de sistemas estructurales, al implantar tecnologías novedosas, como lo son las comunicaciones inalámbricas y sensores inteligentes, además de fusionar estas herramientas con metodología de instrumentación óptima de sistemas estructurales.

Es importante mencionar que esta investigación es de carácter analítico, es decir, la instrumentación de los sistemas estructurales propuestos será implantada, simulada y analizada de manera virtual.

I.3 Objetivos

En esta tesis se pretende resolver dos paradigmas fundamentales para lograr la implantación de redes inalámbricas en sistemas estructurales.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El primero, es encontrar una metodología de instrumentación óptima de sistemas estructurales de fácil aplicación que ayude a determinar cuantos sensores deben de ser colocados en la estructura, así de como deben colocarse dichos sensores, en función de las características dinámicas que se deseé monitorear.

El segundo es analizar el comportamiento que tendrá el flujo de información a través de la red inalámbrica de sensores. De esta manera se podrán anticipar problemas de desbordamiento de memoria, frecuencia de barrido, colapso del sistema, pérdida de la información, colisiones y cuellos de botella.

I.4 Estructura de la tesis

En el capítulo dos se presenta la justificación de este trabajo. Se mencionaran los beneficios de la instrumentación estructural, además se expone el estado actual de la instrumentación de edificaciones. Se presentan los resultados obtenidos del monitoreo de construcciones importantes para la ciudad de México. Además, se exponen algunas metodologías de instrumentación óptima de sistemas estructurales planteadas por diversos autores. Por último, se presentan las bondades que ofrecen las redes inalámbricas de sensores, así como las problemáticas actuales relacionadas con su construcción. También, se definen los algoritmos distribuidos que son parte fundamental en la comprensión y solución del flujo de información a través de la red.

En el capítulo tres se estudia de manera detallada la metodología de instrumentación óptima de sistemas estructurales propuesta por Cherng (2003). Esta integra dos aspectos importantes en la ubicación óptima de sensores, la ponderación geométrica y la información obtenida por cada sensor.

El capítulo cuatro se enfoca al estudio de algoritmos distribuidos. Se presenta la construcción de árboles generadores mediante el uso de dos enfoques alternativos. El primero de ellos se conoce como búsqueda en profundidad o DFS, y el segundo búsqueda en amplitud o BFS.

El capítulo cinco presenta los resultados obtenidos al implantar el algoritmo de instrumentación propuesto por Cherng (2003). Se estudia el comportamiento ante distintos arreglos de instrumentación en una misma estructura con la finalidad de ubicar un arreglo óptimo en el marco plano E2.

En el capítulo seis se presentan los resultados obtenidos al implantar distintas redes de comunicación al arreglo de instrumentación óptimo encontrado para el marco plano E2-90. Esto se realiza con la ayuda de una plataforma software para la implantación, simulación y análisis de algoritmos distribuidos.

Capítulo 2

ANTECEDENTES

A continuación se presentan aspectos fundamentales de la instrumentación de sistemas estructurales. Se mencionan algunas de las ventajas que trae consigo el monitoreo de las características dinámicas de una estructura. Se realiza un compendio del estado actual de la instrumentación de edificaciones en México. Se describe brevemente el funcionamiento de las redes alámbricas de sensores habilitadas en estructuras actualmente.

Se presenta el desarrollo de las metodologías de instrumentación óptima de sistemas estructurales planteadas por distintos autores, con la finalidad de implantar una de ellas en la Instrumentación Inalámbrica de Sistemas Estructurales (IISE).

Además, serán mencionados aspectos esenciales de la comunicación inalámbrica. Se citan algunas aplicaciones de sensores en la actualidad y futuras aplicaciones de redes de sensores inalámbricos.

Por último, se define un sistema distribuido, así como las dificultades de su construcción, las clases existentes, representación gráfica y algunas de las propiedades que los caracterizan.

II.1 Beneficios de la instrumentación estructural

La instrumentación de estructuras ante cargas accidentales tiene la finalidad de monitorear las características dinámicas, así como su comportamiento antes, durante y después de haber sido sometida a una excitación. Es poco practicada en México, y en términos generales, en el mundo.

El monitoreo de estructuras es una manera eficiente de prevenir desastres en edificaciones de gran importancia que ocasionen la pérdida de vidas humanas, así como cuantiosas pérdidas económicas y materiales.

Una razón por la cual las estructuras instrumentadas no son frecuentes tiene que ver con altos costos de instalación y sobre todo mantenimiento de la red de sensores. También la de carecer de una metodología adecuada de instrumentación y de adecuar tecnologías novedosas de fácil manejo.

Algunos de los beneficios que se obtienen al instrumentar una estructura adecuadamente con sensores son los siguientes: determinación de las características dinámicas, conocimiento del comportamiento de la estructura ante condiciones de servicio, monitoreo del desempeño estructural ante excitaciones inducidas, detección de peligro potencial debido a daño de la estructura, inspeccionar la seguridad de estructuras diseñadas con reglamentación previa. Además, la información que arroja el monitoreo de estructuras puede utilizarse en la comprobación de hipótesis y resultados de diversos análisis de modelos matemáticos.

Los beneficios ocasionados por un monitoreo adecuado de estructuras a largo plazo son notables. Al tener un número considerable de edificaciones instrumentadas, los resultados que éstas arrojen pueden ser estudiados, lo cual permitiría validar procedimientos de diseños que repercuten directamente en los códigos vigentes en la localidad (códigos sísmicos y diseño de estructuras).

Además, el monitoreo permanente en edificaciones es útil para estimar la degradación que sufre la estructura, la propagación del comportamiento inelástico, medir el comportamiento estructural ante excitaciones accidentales (sismos de gran intensidad, huracanes, presiones hidrostáticas). También facilita la toma de decisiones sobre estructuras que se requiere rehabilitar, es decir, que elementos estructurales es necesario reforzar y cuales remplazar, extrapolar la respuesta actual de la estructura con la respuesta esperada con un sismo de gran intensidad, determinar la importancia de la interacción suelo-estructura, etc.

II.2 Estado actual de la instrumentación de edificaciones

La instrumentación en sistemas estructurales es un método no destructivo para la detección de daño. En las últimas décadas se ha generado especial interés en los investigadores debido a los avances tecnológicos en dispositivos de medición.

En la actualidad, la gran mayoría de los sistemas estructurales son instrumentados con sensores que miden la aceleración del movimiento en tres direcciones ortogonales. Los registros obtenidos se graban en memoria de estado sólido y pueden ser recuperados a través de un puerto serial mediante una computadora.

Cada sensor convierte la aceleración del suelo en una señal de voltaje, que más tarde es trasformada a palabras digitales mediante un convertidor analógico-digital. Los registros únicamente se graban en la memoria cuando la aceleración rebasa un umbral determinado, almacenando lo que ocurre durante un tiempo previo y posterior a dicho disparo.

Los acelerógrafos se conectan para operar con un disparo y una señal de tiempo común. Uno de los instrumentos opera como maestro y activa al resto de los equipos; de esta manera se obtiene un registro en sincronía. A su vez, el maestro puede contar con un sistema GPS que sirve como referencia de tiempo para todos los equipos de la red. Los instrumentos de medición forman una red de sensores unida mediante cables blindados que envían la información a una computadora.

Un ejemplo de los beneficios de instrumentar una estructura se refleja en el puente de acero US 24 mostrado en la figura 2.1. Una inspección visual indica posible daño en la estructura. La compañía Structural Integrity Systems, LLC, fue contratada para monitorear el puente por el departamento de transporte de Kansas. Los estudios realizados indicaron la necesidad de remplazar el puente.



Figura 2.1 Puente de acero US 24, construido en 1947, ubicado en el condado de Pottawatomie, Kansas (www.structuralintegritysys/pot.htm)

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

Los beneficios de instrumentar una estructura son notables; sin embargo, los altos costos de instalación y mantenimiento, así como una difícil implantación y uso de la red de sensores, ocasionan que pocas estructuras sean instrumentadas.

II.3 Edificaciones instrumentadas en la Ciudad de México

La instrumentación actualmente es una herramienta que aporta beneficios considerables en el monitoreo de estructuras complejas. Su uso se ha incrementado en las comunidades de ingenieros mecánicos, aeroespaciales y civiles.

La instrumentación en la ingeniería civil es utilizada en la determinación de parámetros dinámicos de las estructuras (frecuencia, modos de vibración, amortiguamiento), entre muchas otras propiedades tales como cambios de presión, volumen, temperatura, desplazamiento, aceleración, velocidad, etc. El interés por registrar dichos parámetros se debe a que estos cambian en función de las propiedades físicas de la estructura (masa y rigidez), por tal motivo los cambios que ocurren a lo largo de la vida útil de una edificación (en especial de rigidez) modifican las propiedades dinámicas de la estructura.

En la Ciudad de México existen algunos edificios instrumentados mediante redes alámbricas de sensores. El trabajo de investigación propuesto en esta tesis se basa en la instrumentación inalámbrica de sistemas estructurales cuya finalidad es obtener las propiedades dinámicas, por lo tanto es importante conocer las técnicas y herramientas que se utilizan, así como los resultados que han arrojado estos estudios.

A continuación se presentan los trabajos de instrumentación realizados a diferentes edificaciones.

Muriá y González (1995), establecen recomendaciones básicas para identificar las propiedades dinámicas de edificios a partir de mediciones de vibración ambiental y registros sísmicos. Los resultados obtenidos por los autores muestran que los periodos naturales de vibración son sensibles a las características de los suelos y de los sistemas estructurales.

El sistema de adquisición de datos permite capturar simultáneamente las vibraciones en ocho puntos de la estructura. En cada punto de medición se colocó un acelerómetro para detectar y grabar las señales cuyas amplitudes se encuentran entre 10^{-4} y 10^{-5} g. Estas señales se transmiten a través de cables blindados a unos acondicionadores donde se amplifican y filtran.

En la figura 2.2 se presenta la ubicación de los sensores en el edificio 49 que cuenta con 14 niveles desplantado en suelo blando. Cada uno de los círculos negros representa la ubicación de un sensor.

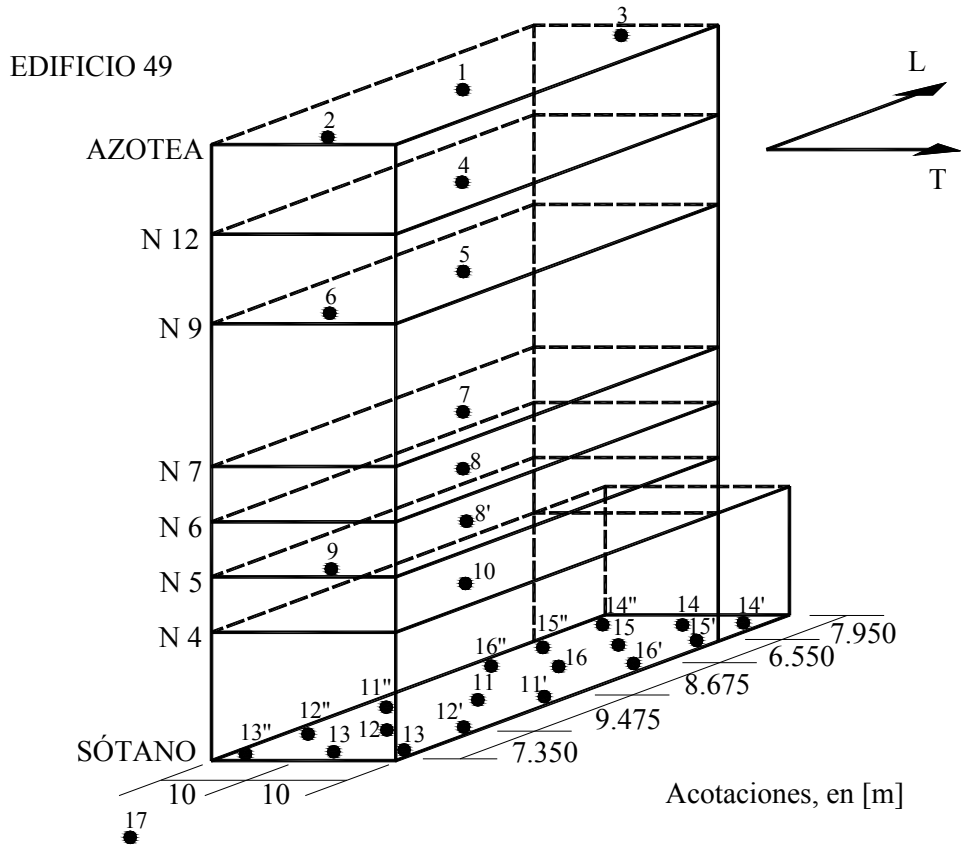


Figura 2.2 Localización de puntos de medición para pruebas de vibración ambiental del edificio 49 (Muría y González , 1995)

Para la obtención de las frecuencias y configuraciones modales en traslación (figura 2.3a), se colocaron los acelerómetros cerca de los centros geométricos de la estructura, manteniendo como referencia el correspondiente a la azotea; en tanto que los otros se localizan en los niveles intermedios. Los modos torsionales de vibración (figura 2.3b), se determinan a partir de registro obtenidos de acelerómetros colocados en los extremos de cada nivel elegido.

En los edificios en los cuales se presente diafragma de piso flexible, el número de puntos de observación en planta debe incrementarse. Se colocarán en la azotea dos sensores en los extremos y un número de puntos intermedios en función de los modos de vibración que se pretenda identificar.

En estructuras donde se pretenda evaluar los efectos de interacción suelo-estructura es necesario incrementar el número de puntos de medición en la cimentación y en el terreno natural, ubicando estos de tal manera que se detecte con claridad la influencia de la flexibilidad del terreno en las características dinámicas del sistema estructural (figura 2.4).

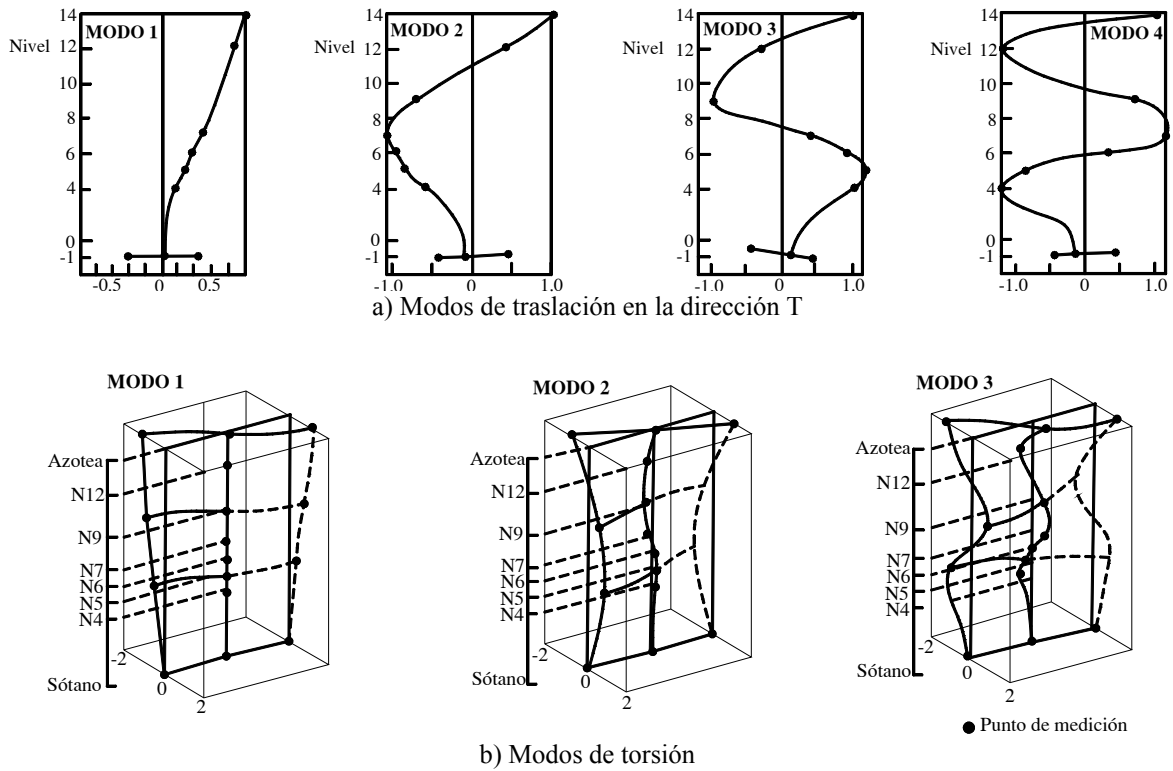


Figura 2.3 Formas modales obtenidas en el edificio 49 (D. Muriá y R. Gonzáles , 1995)

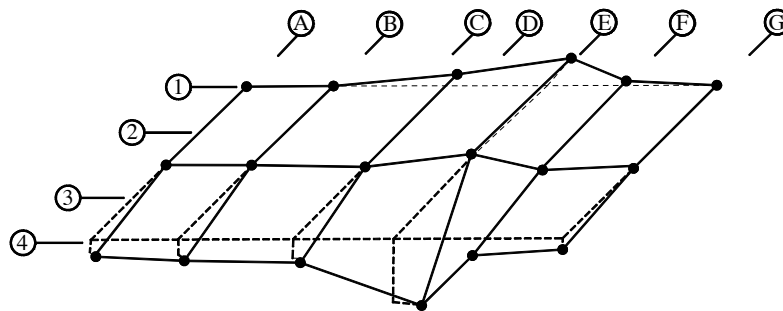


Figura 2.4 Elásticas tridimensionales de la losa de cimentación correspondiente a los modos fundamentales del edificio 49 (Muriá y González , 1995)

Meli, *et. al.* (2001), presentan la descripción de la instrumentación de la Catedral Metropolitana durante los primeros tres años de monitoreo, así como un análisis de resultados. Mencionan la importancia de la instrumentación sísmica de estructuras antiguas con la finalidad de comprobar hipótesis realizadas sobre modelos analíticos, y así lograr un

mejor entendimiento de las características dinámicas de la Catedral. Con la ayuda de los resultados se podrán tomar decisiones adecuadas para la correcta reparación de la Catedral.

La red está compuesta por sensores que miden en las aceleraciones en tres direcciones ortogonales el punto sobre el cual están colocados. Los registros son grabados en una memoria de estado sólido y son recuperados a través de un puerto serial utilizando una computadora.

Los autores mencionan en el reporte que el arreglo de los instrumentos se modificó en varias ocasiones. La instrumentación sísmica a principios del 2000 consta de una red de cinco instrumentos, estos se colocaron en campo libre, sótano centro, azotea centro, torre baja y torre alta.

En la instrumentación sísmica realizada en la Catedral (figura 2.5), el sensor maestro se colocó en la base de la cúpula mayor (azotea centro, AC), el cual transmite la señal de disparo al resto de los acelerógrafos de la red. Además del disparo externo, cada uno de los equipos tiene la posibilidad de activarse por sí mismo al detectar un movimiento local superior al umbral de disparo.

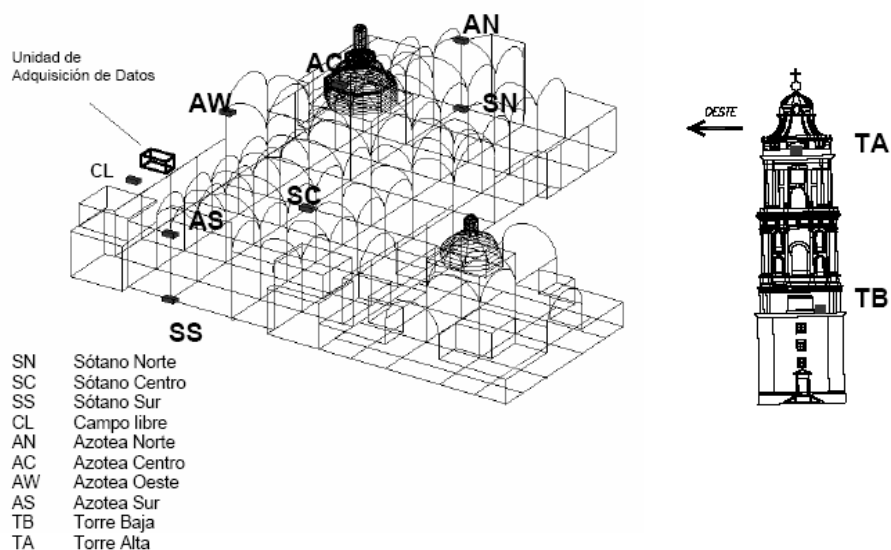


Figura 2.5 Red de instrumentación sísmica de la Catedral Metropolitana (Meli, Rivera, Sánchez y Miranda, 2001)

Alcántara, *et al.* (2004), presentan el diseño de un sistema centralizado de registro sísmico en la torre de telecomunicaciones. La instrumentación de la estructura está integrada por equipos digitales de alta resolución con sensores conectados a un puesto central de registro. Entre las características adicionales se puede mencionar que la instrumentación cuenta con un sistema de control de tiempo GPS, y que puede ser supervisada de manera remota

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

mediante telefonía de línea convencional. Los registros obtenidos a corto y largo plazo, y los estudios que de estos se deriven, permitirán avanzar en el conocimiento de la respuesta dinámica de este tipo de estructuras.

La torre central de telecomunicaciones es una estructura de concreto reforzado, ubicada en la zona de lago pre-consolidado del valle de México. Integrada por 18 niveles, con base en forma de “H”, está resuelta a base de marcos y muros de concreto (figura 2.6a). La cimentación esta constituida por un cajón reticular, a base de muros y contratraves, apoyadas sobre pilotes.

La arquitectura de conexión entre los sensores y los 3 registradores, fue diseñada de tal forma que se pueda evaluar tanto la interacción suelo-estructura, como los efectos de traslación de la base, flexión y torsión. En términos generales se puede señalar que 23 sensores se instalaron en la estructura y 6 en el terreno, de los cuales 3 se encuentran en campo libre y 3 en el subsuelo la (figura 2.6b).

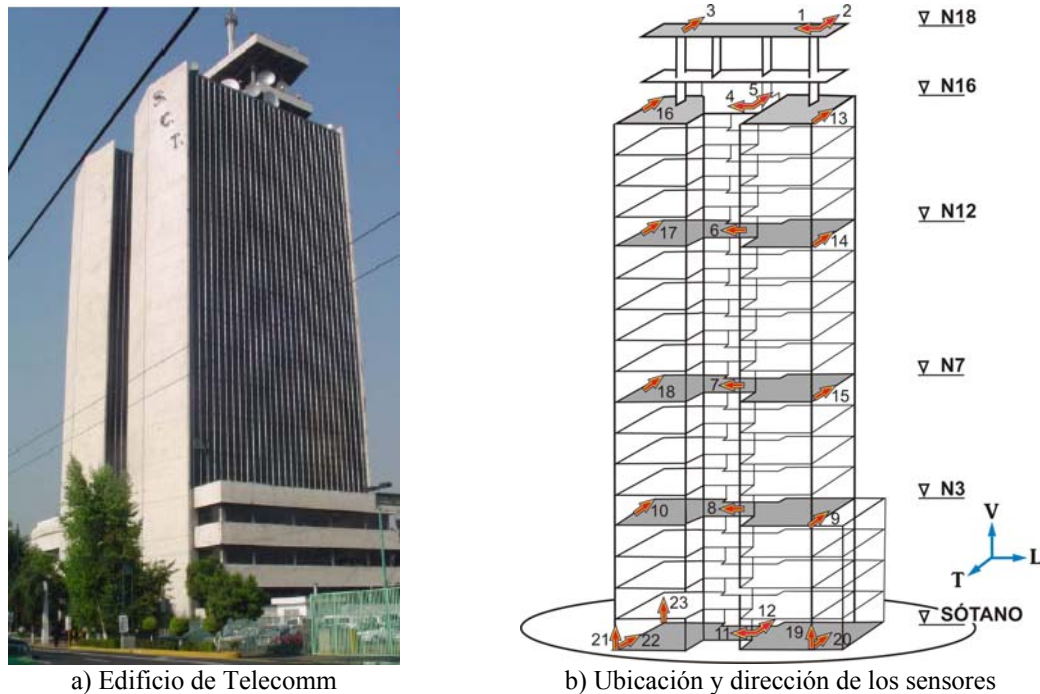


Figura 2.6 Instrumentación del edificio Telecomm (Alcántara, y *et. al.* 2004)

La red está integrada por dos registradores digitales K2 de 12 canales, 1 registrador K2 de 6 canales, 23 acelerómetros uniaxiales ES-U, un acelerómetro triaxial ES-T y un sensor triaxial de pozo SBEPI. La conexión se realizó mediante cable Belden, desde cada punto de medición al puesto central de registro, el cual se ubica en el sótano del edificio.

II.4 Metodologías de instrumentación óptima de sistemas estructurales

La bibliografía presentada a continuación está relacionada con metodologías de instrumentación óptima en sistemas estructurales. En ella se abordan distintas propuestas de instrumentación. En capítulos posteriores se retoma una de estas metodologías con la finalidad de implantarla a un sistema estructural.

Shah y Udwadia (1978) abordan la problemática de la posición óptima de sensores para estimar los parámetros dinámicos en edificios. La solución propuesta está basada en la relación lineal entre las pequeñas perturbaciones en dimensiones finitas y lo observado de la respuesta del sistema a lo largo del tiempo. La localización de los sensores está determinada por la minimización de la matriz de covarianza. La metodología puede aplicarse sólo en la instrumentación de estructuras modeladas con vigas de cortante.

Udwadia (1994) estudia una metodología de localización óptima de sensores en sistemas dinámicos. Ésta se basa en la matriz de información Fisher (MIF). El método propuesto por el autor es aplicable a sistemas lineales y no lineales de múltiples grados de libertad. El autor modela un sistema de tres grados de libertad asignando a cada uno de ellos un sensor y después calcula la matriz Fisher. Esta matriz da como resultado la ubicación óptima del sensor al basarse en la cercanía lograda en comparación con la rigidez analítica del sistema estructural.

Heredia (1996) presenta criterios de instrumentación óptima de sistemas estructurales. La metodología propuesta por el autor está definida en términos de la función de pérdida Bayesiana. Esta función se relaciona con la matriz de información Fisher. Con el propósito de corroborar sus hipótesis, el autor implementa dicha metodología a un sistema de múltiples grados de libertad sujeto a un grupo de excitaciones sísmicas con diferentes coeficientes de variación. En el primer paso los sensores se colocan en cada grado de libertad; posteriormente se realiza la simulación, con la finalidad de obtener la función de pérdida del sistema estudiado. Dicha función es clave angular debido a que proporciona la ubicación óptima del sensor, la cual está relacionada directamente con los valores mínimos obtenidos en los coeficientes de la función de pérdida.

Heredia y *et. al.* (1999) retomaron criterios de localización óptima de sensores en sistemas estructurales, publicados previamente por Heredia (1996). La metodología propuesta por los autores se aplica a sistemas estructurales desplantados en suelos blandos, esto con la finalidad de verificar hasta qué grado son afectados los sistemas de instrumentación.

Ka-Veng y *et. al.* (2001) presentan una metodología para diseñar las configuraciones óptimas y rentables de sensores para la actualización de modelos y detección de daño

estructural. La configuración óptima es seleccionada tal que los datos registrados den la mayor información acerca de la condición de la estructura. La selección está basada en la medida de la entropía de la información de las incertidumbres en los parámetros del modelo usando un método estadístico de la identificación del sistema. Se aplica la metodología propuesta a un sistema de múltiples grados de libertad excitado en la base. Los resultados obtenidos muestran que el número de sensores requeridos y su ubicación están en función de las formas modales que sea necesario obtener.

Cherng (2003) presenta una sistematización del proceso de instrumentación en sistemas estructurales. El autor realiza un análisis de las metodologías existentes que auxilian a la instrumentación de estructuras (matriz de información Fisher, función de pérdida Bayesiana). De estas metodologías obtienen un algoritmo que relaciona los beneficios de cada una de ellas, posteriormente realiza una simulación de dicha metodología en un sistema estructural.

II.5 Redes inalámbricas de sensores (RIS)

En la actualidad la presencia de las comunicaciones inalámbricas (figura 2.7) se ha incrementado de manera considerable. Existen diferentes tecnologías que utilizamos día con día dependiendo de las necesidades que se tengan que satisfacer. Un claro ejemplo es el teléfono celular el cual se ha convertido en un accesorio indispensable.

La tecnología modifica la manera en que vivimos, trabajamos e interactuamos con el medio que habitamos. En los años siguientes se espera que sean construidos sensores capaces de monitorear una cantidad de fenómenos físicos, químicos, biológicos, entre muchos otros, con un grado de sofisticación nunca antes visto, además dichos dispositivos tendrán costos accesibles.

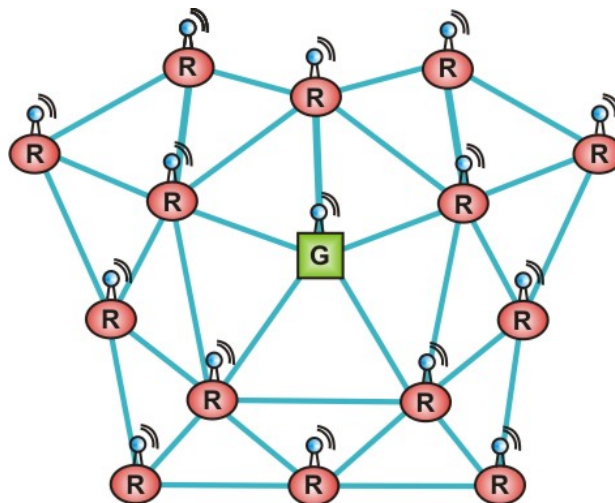


Figura 2.7 Comunicaciones inalámbricas (www.machinedesign.com)

Los sensores se implantarán en muy poco tiempo en las grandes ciudades del mundo, vías terrestres, maquinaria, en los campos de cultivo, en selvas y desiertos, e incluso en lugares en donde al ser humano le resulta difícil o imposible visitar (las profundidades del mar, desastres químicos o ambientales e incluso otros planetas).

Un sensor es diseñado para actuar como un procesador de información de alto nivel en tareas relacionados con detección, rastreo y clasificación. La medida de activación para cada una de las tareas que tiene que desarrollar los microprocesadores está bien definida, incluyendo la detección de falsas alarmas, errores de clasificación y calidad de rastreo.

Los sensores son fuentes de información tan variados como lo son las medidas que realizan. Existen sensores que registran temperatura, luminosidad, presión, humedad, velocidad, aceleración, presencia, volumen y un sin fin de magnitudes por mencionar algunas. Si a estos sensores que nos reportan información tan valiosa, les añadimos la capacidad de comunicación inalámbrica y la posibilidad de formación de redes ad-hoc, obtenemos como resultado sistemas eficientes que pueden ayudarnos a solucionar problemas actuales.

Se presentan a continuación algunas aplicaciones en las que se podría habilitar redes inalámbricas de sensores.

- a) Monitoreo del ambiente (transito, habitat, seguridad)
- b) Industria (fábricas)
- c) Infraestructura (distribución de servicios agua, luz, combustibles)
- d) Fines bélicos (conocimiento del campo de batalla)
- e) Casas inteligentes

Frodigh, Johansson y Larsson (2000), presentan numerosos factores asociados con la tecnología, los negocios, las regulaciones y el comportamiento social. Estos factores sugieren de manera natural y lógica, la formación de redes inalámbricas *ad hoc*.

En términos generales una red *ad hoc*, consta de nodos que usan una interfaz inalámbrica para enviar paquetes de datos, sin ninguna administración central. Debido a que los nodos de una red de este tipo pueden servir de encaminadores, pueden enviar paquetes en nombre de otros nodos y ejecutar las aplicaciones del usuario.

Las raíces de la formación del redes *ad hoc* surgen en 1968, cuando se iniciaron los trabajos en la red ALOHA (el objetivo de esta red era conectar centros educativos en Hawai). Aunque se emplearon estaciones fijas, el protocolo ALOHA se presentaba a la gestión distribuida de acceso a canales, y de aquí que sentase las bases para el posterior desarrollo de esquemas de acceso distribuido a canales que eran los adecuados para la formación de redes *ad hoc*.

Inspirados en la red ALOHA, DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) comenzó a trabajar, en 1973, en la PRnet (packet radio network), una red de enlaces múltiples, es decir, los nodos que la constituían cooperaban en la retransmisión del tráfico en beneficio mutuo para llegar a estaciones distantes que de otra manera habrían estado fuera de su alcance.

Aunque posteriormente se desarrollaron muchas redes de paquetes de radio experimentales, estos sistemas inalámbricos nunca resultaron atractivos para los consumidores. Cuando se estaba desarrollando IEEE 802.11, un estándar para redes de área local inalámbrica, el IEEE (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica) sustituyó el término red de paquetes de radio por el de red *ad hoc*. Las redes de paquetes de radio habían llegado a ser asociados con las redes de enlaces múltiples de las operaciones militares o de rescate a gran escala y, mediante la adopción de un nuevo nombre, el IEEE esperaba indicar un nuevo escenario de desarrollo.

En la actualidad visualizamos una red *ad hoc* con el escenario mostrado en la figura 2.8, donde las personas llevan dispositivos que pueden conectarse en régimen *ad hoc*. Los dispositivos de un usuario pueden interconectarse entre sí como conectarse a puntos de información local. Por ejemplo, para consultar actualizaciones de salidas de vuelo, cambios de puerta, etc. Los dispositivos *ad hoc* pueden también retransmitir tráfico entre dispositivos que estén fuera de su alcance. Por lo tanto, el escenario del aeropuerto contiene una mezcla de saltos de radio simple y múltiple.

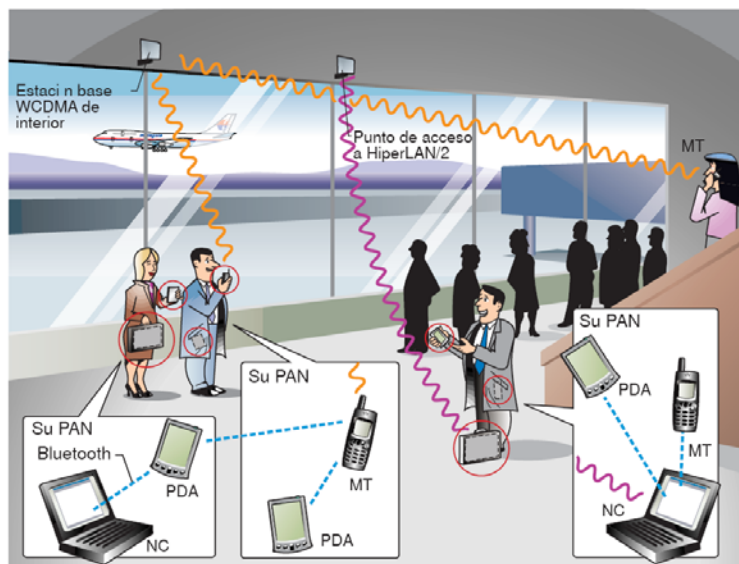


Figura 2.8 Representación de una red de área local donde los usuarios pueden utilizar conexiones bluetooth ad hoc para interconectar los dispositivos transportados (Frodigh, Johansson y Larsson, 2000)

No obstante con los avances tecnológicos en las nuevas generaciones de sensores surgen desafíos. Estos se relacionan con el procesamiento de la información a través de la red, problemas de escalabilidad y saturación de canales. Además, pueden presentarse fallas locales en los sensores, colapso de la batería y daño físico en el sensor. Con la finalidad de prever dichos problemas es necesario lograr una red autoconfigurable y tolerante a fallas.

II.6 Algoritmos distribuidos

Marcelín (2004_a). En términos generales un sistema distribuido puede concebirse como una colección heterogénea de componentes de hardware, software y datos, interconectados por algún tipo de red de comunicación mediante la que colaboran para ofrecer un servicio relacionado con el manejo de información, como pueden ser: operación de telecomunicaciones, transacciones sobre una base de datos, cálculos científicos, control de procesos en tiempo real.

Schneider (1993). Las dificultades de su construcción tienen su origen en las limitaciones de los componentes con los que se integra un sistema distribuido, así como en la diversidad de características que deben reunirse y coordinarse en un todo funcional. Se desea un sistema distribuido que garantice la calidad de sus servicios, a pesar de que un cierto número de componentes falle o se aleje de sus especificaciones de operación.

Lamport y Lynch (1990). Los sistemas distribuidos pueden dividirse en dos grandes categorías:

1. El paso de mensajes.
2. La memoria compartida.

En la primera se enfatiza el papel de la red de comunicación. Ésta se describe como una gráfica no dirigida $G = (V, E)$ como se ilustra en la (figura 2.9), donde el conjunto de nodos V , representa a los procesadores de la red y el conjunto E de enlaces o aristas representan los canales bidireccionales de comunicación que conectan a las máquinas y por donde se intercambian mensajes. No existe un recurso de almacenamiento común a varios procesadores y cada uno de ellos tiene una identidad única. Cada nodo procesa los mensajes que recibe de sus vecinos, realiza un cálculo local y envía mensajes a sus vecinos. Todos los mensajes tienen una longitud acotada y sólo pueden transportar una cantidad limitada de información. Cada mensaje transmitido se recibe al cabo de un tiempo finito.

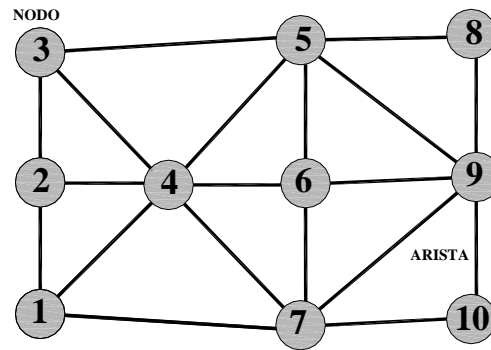


Figura 2.9 Representación de $G = (V, E)$

Herlihy (1988). En la segunda categoría, los procesos se comunican efectuando operaciones de almacenamiento y recuperación de la información sobre un espacio común. Esta está organizado en objetos compartidos tales como registros de lectura/escritura, colas o registros con operaciones atómicas del tipo “test&set”.

II.7 Sensores inteligentes

Ruiz-Sandoval, *et. al.* (2004). Los sensores, la comunicación inalámbrica, los sistemas Micro Electro Mecánicos (conocidos por sus siglas en inglés como MEMS), y la tecnología de información sufren avances día con día. El uso de MEMS ha hecho posible el sueño de tener la detección ubicua y, en particular, la detección "inteligente". Los dispositivos MEMS son manufacturados usando diferentes tecnologías de integración a gran escala y que pueden incorporar funciones tanto mecánicas como eléctricas. Esta tecnología, y su paradigma de diseño, tiene la ventaja principal que permite la miniaturización de aplicaciones. Las características de tamaño de los MEMS están típicamente en la escala de los micrones (el 1e-6m), y pueden ser utilizados en un ambiente tanto para su monitoreo, como para actuar en él.

La producción en masa de MEMS, para una variedad de usos, ha reducido su costo a niveles de algunos dólares, y con su popularidad en aumento, la tendencia está hacia centavos de dólar. Además, mejoras en las tecnologías de otros componentes importantes (por ejemplo, bancos de memoria, radiotransmisores, y baterías, etc.) permitirá dispositivos duraderos más capaces y de mayor alcance, y así reduciendo costos de mantenimiento.

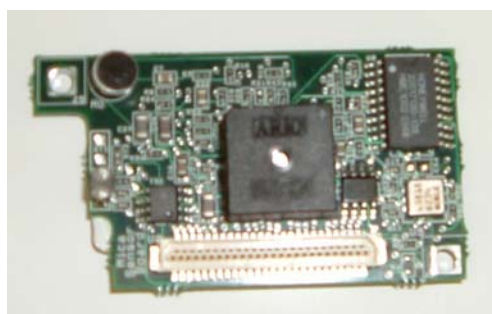
La plataforma de pequeñas partículas (“mote” en inglés) que desarrolló la Universidad de California en Berkeley, con el financiamiento de DARPA, permite por vez primera, un ambiente abierto de software/hardware para la amplia investigación de detección inteligente. Además del pequeño tamaño físico, bajo costo, del consumo de energía modesto, y de la diversidad en su diseño y uso, una de las ventajas principales de usar el

“mote” de la plataforma Berkeley (Berkeley, 2003) es que permite liberar el uso de recursos que ya han sido invertidos por DARPA.

El paradigma mote consiste en cuatro componentes básicos: energía, cómputo, sensores, y comunicación. Los motes son capaces de autonomía y de la interconexión con otros motes. El diseño del sensor es compuesto por dos partes principales: la tablilla que contiene el procesador/radio (Mica), y la tablilla de sensores. El microprocesador del Mica es el Atmega103 con una CPU de 4 MHz, 128 KB de memoria flash, y 512 bytes de memoria para datos. Este microprocesador tiene tres modos de ahorro de energía: (i) inactivo, el cual tiene el procesador apagado, (ii) bajo consumo, que sólo conserva encendido el observador y la interrupción asincrónica necesaria para despertar el sistema, y (iii) economía, que es similar al modo de la energía de bajo consumo, pero deja en funcionamiento un contador de tiempo asincrónico. La radio del Mica consiste en un transmisor-receptor RF Monolithics con una frecuencia central de 916.5 MHz en el cual puede funcionar a velocidades de 19.2 Kbps.

Las tablillas de sensores se pueden conectar con al Mica a través de un receptor-transmisor asincrónico universal interno (conocido por sus siglas en inglés UART - Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). El Mica tiene la flexibilidad para conectar diversos circuitos integrados; es decir, tiene la modularidad para soportar diversos tipos de sensores que se diseñen según las demandas del usuario. Los diseños actuales del tablero del sensor para la plataforma de la MICA son: MTS101CA, MTS300CA y MTS310CA (CrossBow Technologies, Inc. 2004).

La tablilla de sensores MTS310CA (figura 2.10), consta de un actuador acústico, y 5 diferentes tipos de sensores, los cuales son: de luz, de temperatura, acústico, de aceleración, y sensores magnéticos. La tablilla de sensores MTS310CA emplea el acelerómetro de ADXL202E (tabla 2.1).



MTS310CA

Figura 2.10 Tablilla de sensor (Ruiz-Sandoval y *etal.* 2004)

Tabla 2.1 Características del acelerómetro ADXL202E

Parámetro	Mínimo	Típico	Máximo	Unidades
<i>Rango de entrada</i>	-	± 2	-	g
<i>Frecuencia de respuesta (nominal, 3dB)</i>	-	0-50	-	Hz
<i>Sensitividad</i>	140	167	195	mVolts/g
<i>Ruido de salida (RMS)</i>	-	200	-	$\mu\text{g}/(\sqrt{\text{Hz}})$
<i>Voltaje de operación</i>	-	3.0	-	Volts
<i>Corriente de operación</i>	-	0.6	1.0	mA

Capítulo 3

UBICACIÓN ÓPTIMA DE LOS SENSORES

En el capítulo anterior fueron abordadas distintas propuestas de instrumentación, con la intención de tomar la que mejor convenga al proyecto de IISE. Después de presentar los distintos enfoques de instrumentación, se optó utilizar la metodología propuesta por Cherng (2003). En esta se integran dos aspectos importantes en la ubicación óptima de sensores: la ponderación geométrica del sensor (su ubicación en la estructura), y la de la información obtenida.

Además, en la metodología convergen criterios estudiados por diversos autores, así como un algoritmo de programación claro en el que intervienen de forma directa las características dinámicas de la estructura (matriz de rigidez, masas y amortiguamiento).

A continuación será abordada de una manera detallada aspectos fundamentales estudiados por Cherng en su trabajo. Estos se relacionan con las metodologías de instrumentación propuestas por Bayard-Hadaegh-Meldrum (BHM) y Lim-Gawronski (LG).

III.1 Enfoque Lim-Gawronski (LG)

Cherng describe el método LG. Este método acumula la contribución directa de cada sensor con respecto de la ubicación que tenga en la estructura, así como la forma modal que sea desea monitorear. La contribución fraccional de cada sensor es evaluada con respecto de la contribución total de conjunto de los sensores. Dicha contribución se define en términos de la suma de los elementos diagonales de la matriz $H^T H$.

$$\gamma^2 = \text{trace}(H^T H) = \sum_{r=1}^n (\sigma_r^2 + \bar{\sigma}_r^2) = \sum_{r=1}^n (\alpha_r^2 + \bar{\alpha}_r^2) \epsilon_r^2 \quad (3.1)$$

$$\gamma^2 = \sum_{r=1}^n \left\{ (\alpha_r^2 + \bar{\alpha}_r^2) \left(\sum_{i=1}^m \phi_{ir}^2 \right) \left(\sum_{l=1}^p \bar{\phi}_{lr}^2 \right) \right\} \quad (3.2)$$

$$\gamma^2 = \sum_{i=1}^m \left\{ \sum_{r=1}^n \left\{ (\alpha_r^2 + \bar{\alpha}_r^2) \phi_{ir}^2 \left(\sum_{l=1}^p \bar{\phi}_{lr}^2 \right) \right\} \right\} \quad (3.3)$$

$$\gamma^2 = \sum_{i=1}^m \left\{ \sum_{r=1}^n \tilde{\gamma}_{ir}^2 \right\} \quad (3.4)$$

$$\gamma^2 = \sum_{i=1}^m \gamma_i^2$$

donde:

$$\gamma_i^2 = \sum_{r=1}^n \tilde{\gamma}_{ir}^2 \quad (3.5)$$

En la ecuación anterior, $\tilde{\gamma}_{ir}^2$ simboliza la contribución del i -ésimo sensor de la r -ésima forma modal. A su vez, γ_i^2 representa la posición de la contribución del i -ésimo sensor ubicado sobre n objetivos modales. La ecuación 3.5 se puede agrupar de forma matricial.

$$\Gamma_{LG} = \begin{bmatrix} \bar{\gamma}_{11}^2 & \bar{\gamma}_{12}^2 & \cdots & \bar{\gamma}_{1n}^2 \\ \bar{\gamma}_{21}^2 & \bar{\gamma}_{22}^2 & \cdots & \bar{\gamma}_{2n}^2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \bar{\gamma}_{m1}^2 & \bar{\gamma}_{m2}^2 & \cdots & \bar{\gamma}_{mn}^2 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

La matriz Γ_{LG} , puede entenderse de la siguiente manera, cada columna representa la distribución de energía del modo sobre el sensor m y cada renglón representa la contribución de la ubicación de un sensor sobre los n modos objetivo. El índice de

ubicación del i -ésimo sensor puede ser definido como la fracción de contribución (ecuación 3.7), por tal motivo se encuentra comprendido en el intervalo de cero y uno.

$$\varphi_i = \frac{\gamma_i^2}{\gamma^2}, \quad 0 \leq \varphi_i \leq 1 \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^m \varphi_i = 1 \quad (3.8)$$

La mejor combinación de la locación de sensores m_s se encuentra ordenando los mayores índice de locación, φ_i 's, de las posibles m locaciones de sensores. De acuerdo con lo anterior, se puede indicar que una de las ventajas de este método es que la búsqueda de la mejor combinación de locación de sensores se puede llevar a cabo por un algoritmo de ordenamiento. Por lo tanto, no es necesario realizar pruebas de combinaciones o iteraciones para comparar la importancia de las combinaciones. Esta solución no es óptima, pero provee de una formulación poco sencilla para determinar la importancia de los sensores. El método LG es también conocido como “método de trazo” o “método de promedio geométrico”.

III.2 Enfoque Bayard-Hadaegh-Meldrum (BHM)

Cherng describe el método BHM, como un algoritmo de dos pasos. El primero es realizar la suma de la contribución modal registrada por la locación de todos los sensores. El segundo es clasificar por orden de importancia el producto de estas contribuciones. Se propone una replanteamiento del enfoque original BHM en un marco de la correlación subespacial de señales.

La raíz cuadrada del determinante de $H^T H$, es el producto de las formas modales diferentes de cero, de los Valores Singulares Hankel (HSVs) de H , como se muestra a continuación.

$$S = \det(H^T H)^{1/2} = \prod_{r=1}^n \sigma_r \bar{\sigma}_r = \prod_{r=1}^n \alpha_r \bar{\alpha}_r \varepsilon_r^2 \quad (3.9)$$

$$S = \left\{ \prod_{r=1}^n \alpha_r \bar{\alpha}_r \right\} \left\{ \prod_{r=1}^n \varepsilon_r^2 \right\} = S_1 S_2 \quad (3.10)$$

La contribución de la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento en S_1 , están separados de las formas modales en S_2 . El primer termino de S_1 es constante para los modos normales, por tal motivo puede ser eliminado de la secuencia. Al realizar un poco más de álgebra se encuentran las siguientes expresiones:

$$S \propto S_2 = \prod_{r=1}^n \varepsilon_r^2 = \prod_{r=1}^n \mu_r^2 \bar{\mu}_r^2 \propto \prod_{r=1}^n \mu_r^2 = \psi \quad (3.11)$$

donde:

$$\psi = \prod_{r=1}^n \|\phi_r\|^2 = \prod_{r=1}^n \phi_r^T \phi_r = \det(\text{diag}(\Phi^T \Phi)) \quad (3.12)$$

La matriz Φ está integrada por vectores columna llamados simplemente ϕ_r . Las ecuaciones 3.11 y 3.12, señalan que en el producto de los HSV, S , es proporcional al índice de ubicación ψ , el cual también es la Matriz de Información Fisher (FIM) del método BHM. Se confirma que la maximización del producto de los HSVs, es equivalente a la maximización de la forma modal de la ubicación del sensor. Debido a que el resultado es el producto de los valores extraídos de la diagonal de la matriz de correlación $\Phi^T \Phi$, el método BHM es llamado “el método del determinante” o “método de la media geométrica”.

El método BHM construye una matriz, la cual puede ser formada tomando en cuenta los vectores de las formas modales, estos se representan en la ecuación 3.13.

$$\Gamma_{\text{BHM}} = \begin{bmatrix} \phi_{11}^2 & \phi_{12}^2 & \dots & \phi_{1n}^2 \\ \phi_{21}^2 & \phi_{22}^2 & \dots & \phi_{2n}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_{m1}^2 & \phi_{m2}^2 & \dots & \phi_{mn}^2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Para calcular el índice de locación ψ se requerirá simplemente obtener la norma L_1 de las columnas. La evaluación de la contribución modal puede ser obtenida modo por modo (es decir independientemente), y esto se indica en la ecuación 3.13. Finalmente, como se esperaba, si los modos de interés difieren este procedimiento producirá diferentes resultados.

Una forma de compensar la posible divergencia en productos de una estructura muy grande, el método BHM sugiere calcular el logaritmo natural que reemplacé el original ψ , esté es mostrado en la ecuación 3.14.

$$\psi' = \log\left(\prod_{r=1}^n \phi_r^T \phi_r\right) = \sum_{r=1}^n \log(\phi_r^T \phi_r) \quad (3.14)$$

Cherng considera que ya que la función del logaritmo es monotónica, la ecuación 3.14, puede pensarse que tendrá una respuesta muy cercana a la solución original.

Las frecuencias naturales y factores de amortiguamiento contenidos en α_r y $\bar{\alpha}_r$, no son afectados por la ubicación de los sensores, por lo que pueden ser omitidos en el proceso de optimización, siempre y cuando las se considere que el sistema contenga los modos de interés normales. Si se cumple lo anterior, el uso del tipo de sensor (de aceleración, velocidad o desplazamiento) puede ser usado sin pérdida de generalidad. Un inconveniente computacional del método BHM es que éste se lleva más tiempo en ser procesado en comparación del método LG.

III.3 Diferencias entre las metodologías de instrumentación LG y BHM

Cherng (2003) indica las principales diferencias entre las metodologías LG y BHM. Como se mencionó anteriormente, el método BHM puede ser interpretado como la maximización de la energía modal geométrica promedio, mientras que el método LG puede entenderse como el promedio aritmético de la energía modal. Por tal motivo el método BHM tiende a conservar las ubicaciones que poseen los niveles de energía modal más próximos como resultado de la multiplicación.

En comparación el método LG puede terminar seleccionando simultáneamente las ubicaciones más fuertes o débiles, ya que la suma no puede diferenciar la contribución modal individual. Es posible que el desequilibrio de las combinaciones modales pueda corregirse mediante la multiplicación de los factores o elementos de peso en cada modo, no obstante no existe garantía que una solución óptima pueda ser encontrada por el método LG.

Además, dicho método debe de utilizarse con precaución o bajo ciertas restricciones, esto debido a que la construcción modal depende de los HSVs, cada uno de éstos, no es sólo proporcional a la constante modal sino también es inversamente proporcional al amortiguamiento y la frecuencia natural.

Para los sensores de desplazamiento, los modos de baja frecuencia tienden a producir relativamente mayores HSVs que los modos de frecuencias altas. Por otro lado, los modos de alta frecuencia resultan en mayores HSVs para los sensores de aceleración. El amortiguamiento es un factor que no puede descuidarse, por tal motivo los sensores de velocidad pueden ser la mejor opción ya que eliminan las componentes de frecuencia en las HSVs.

En resumen, las formas modales son favorecidas sobre los HSVs cuando un modelo de elemento finito adecuado está disponible antes de que se lleve a cabo la prueba modal. Bajo estas circunstancias la ecuación 3.13, puede utilizar ambos métodos, sólo cuando el propósito sea encontrar el sensor que contribuya en mayor media.

Si se tiene como propósito colocar en categoría a los sensores, el método BHM desempeña un esfuerzo notable debido a que busca la configuración óptima entre todas las posibles combinaciones. Cuando el costo computacional es una variable considerable, en especial cuando $m_s \ll m$, el método LG es la mejor opción.

III.4 Igualación de los modos

Cherng (2003), menciona que no obstante que el método LG normaliza el total de las contribuciones de cada uno de los sensores (ecuación 3.7), es probable que exista un intervalo vacío de energía en los modos caracterizados, para poder solucionar esto, se propone normalizar cada modo de tal forma que las metodologías LG y BHM, puedan emplearse de igual manera antes de la clasificación.

Al normalizar la contribución del i -ésimo sensor a la r -ésima forma modal, se define la relación de los valores singulares correspondientes a las formas modales, ecuaciones 3.15 y 3.16.

$$\rho_{ir} = \frac{\sigma_{ir}^2}{\sigma_r^2} = \frac{\phi_{ir}^2}{\sum_{i=1}^m \phi_{ir}^2} = \frac{\phi_{ir}^2}{\|\phi_r\|^2} = \frac{\bar{\sigma}_{ir}^2}{\bar{\sigma}_r^2} = \bar{\rho}_{ir}, \quad 0 \leq \rho_{ir}, \bar{\rho}_{ir} \leq 1 \quad (3.15)$$

donde:

$$\sum_{i=1}^m \rho_{ir} = 1 \quad \forall_r \quad (3.16)$$

Por tal motivo, cada modo aporta la misma contribución (igual a la unidad), además el total de las distribuciones de los sensores esta representada en n . Debe de tomarse en cuenta que la contribución de los sensores se transforma de valores singulares a formas modales, esto sin perder validez. Mientras tanto la frecuencia natural y amortiguamiento difieren de los tipos de sensores, a pesar de que la forma modal pueda dar como resultado un orden diferente en las categorías, en comparación del método LG. Se espera que dichas modificaciones en los balances de contribución de los modos, deban estar próximas a la solución óptima propuesta por BHM, además debe considerarse la división de las contribuciones de la HSV, con ello se demuestra que las pequeñas diferencias en el amortiguamiento no influyen en el resultado, por lo tanto, sólo es tomada en cuenta la contribución del sensor.

Con la finalidad de ilustrar lo descrito anteriormente se replantean las ecuaciones 3.13 y 3.15, con la finalidad de establecer una matriz de contribución $m \times n$, ecuación 3.17.

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \rho_{m1} & \rho_{m2} & \cdots & \rho_{mn} \end{bmatrix} = [\rho_1 \quad \rho_2 \quad \rho_3 \quad \rho_4] \quad (3.17)$$

donde:

$$\rho_i = \sum_{i=1}^n \rho_{ir} \quad 0 \leq \rho_i \leq n \quad (3.18)$$

$$\sum_{i=1}^m \rho_i = n \quad (3.19)$$

La caracterización del i-ésimo sensor esta basada en el valor numérico de ρ_i , además la ubicación del sensor que tenga un valor pequeño de ρ_i , puede eliminarse directamente del conjunto de posibles sensores con ello surgiría una modificación del método LG. Las pruebas de correlación pueden ser utilizados para eliminar ubicaciones con el mismo patrón de contribuciones antes del proceso de asignación de categoría. Debe de hacerse énfasis en que las formas modales deben ser estandarizadas de lo contrario no será representativa la ubicación del sensor. Cuando es empleada la metodología BHM, la anterior validación se mantiene. El resultado de la configuración óptima del sensor será el mas cercano al la unidad, mientras que el logaritmo natural que es considerado en el método BHM no es necesario. El algoritmo del método BHM se presenta en la ecuación 3.20.

$$\psi = \prod_{r=1}^n \sum_{i=1}^m \rho_{ir} = \prod_{r=1}^n \|\rho_r\|_1 \quad (3.20)$$

En está metodología las diferencias de peso pueden aplicarse de manera individual, sí fuese necesario, además puede resultar una clasificación de sensores diferentes a los propuestos por la metodología LG, pero sin afectar a la solución óptima propuesta por el método BHM.

Capítulo 4

ALGORITMOS DISTRIBUIDOS

En el capítulo 2, fueron abordados conceptos básicos relacionados con algoritmos distribuidos, a continuación se estudia de forma detallada la construcción de árboles generadores.

Para la construcción de un árbol generador existen varios métodos. De entre estos se reconocen dos enfoques alternativos como los más usados: la *búsqueda en profundidad* o DFS (Depth First Search) y la *búsqueda en amplitud* o BFS (Breadth First Search).

Aún cuando con ambas metodologías se construye un árbol generador, existen diferencias tanto en la complejidad de los algoritmos, como en las propiedades de los árboles erigidos. Dichas características pueden utilizarse en beneficio del problema que se requiera solucionar.

Es fundamental entender la construcción y el comportamiento de un árbol generador mediante las metodologías mencionadas anteriormente, ya que son la clave en la solución de las problemáticas concernientes a la conectividad de una red inalámbrica de sensores, así como en el manejo de la información.

IV. 1 Árboles generadores

Antes de iniciar el estudio del proceso de construcción de cualquier árbol generador, es necesario abordar algunos conceptos básicos.

En sistemas distribuidos es frecuente representar a una red de comunicación mediante la gráfica $G = (V, E)$, donde el conjunto de nodos “V” representa los procesadores de la red y el conjunto de aristas “E” representa los canales bidireccionales de comunicación, (figura 4.1). Además, dicha gráfica tiene la propiedad de ser conexa, es decir, hay un camino o trayectoria entre cualquier pareja de nodos por tal motivo mientras se le recorre puede ser construida una subgráfica que incluya a todos los vértices de la grafica utilizando un número mínimo de aristas, con ello se logra la construcción de un *árbol generador*, (figura 4.2). Una de las características trascendentales en dichas estructuras, se relacionan con la reducción del intercambio de información, lo cual repercute directamente en la complejidad de las tareas ejecutadas.

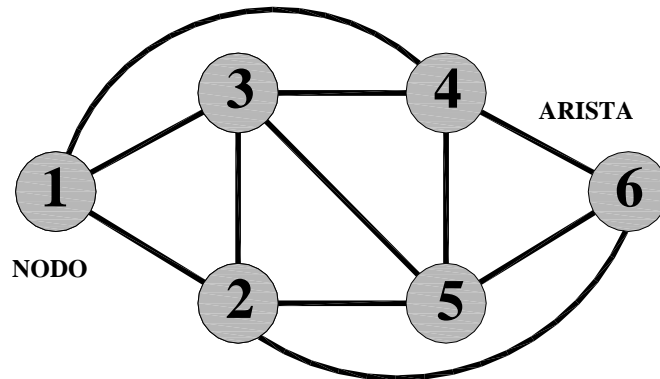


Figura 4.1 Representación de la gráfica $G = (V, E)$

Para construir un árbol generador existen varios métodos. De entre estos se reconocen dos enfoques alternativos como los más usados: la *búsqueda en profundidad* o DFS (Depth First Search) y la *búsqueda en amplitud* o BFS (Breadth First Search). A continuación será abordado el procedimiento de construcción de ambas metodologías.

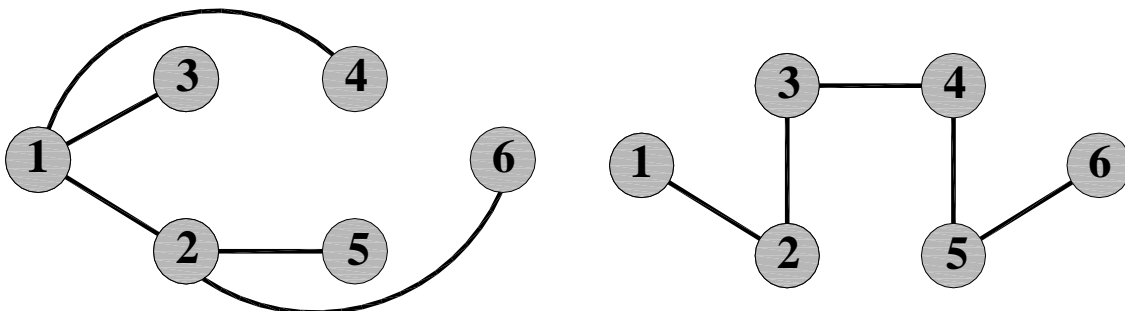


Figura 4.2 Árboles generadores

IV.2 Construcción de un árbol Depth First Search (DFS)

Chang (1983) y Cidon (1988). Al iniciar el algoritmo, los procesos participantes poseen las mismas instrucciones del código, por tal motivo se dice que existe una condición de simetría inicial en el conjunto. Es frecuente en programación distribuida otorgar un privilegio a uno de los procesos del sistema, con ello se logran fracturar el equilibrio inicial.

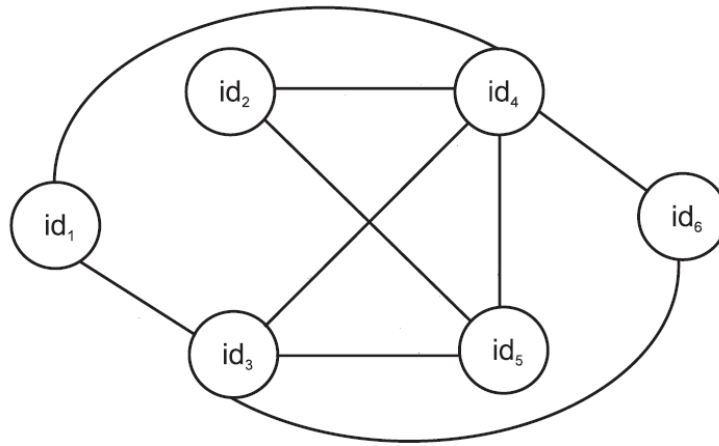
El algoritmo DFS, da inicio cuando se fractura la simetría del conjunto debido a la asignación de un proceso arbitrario *s* que será el encargado de arrancar el algoritmo. Se dice que *s*, inicial la circulación de una *ficha* o mensaje de activación con el que selecciona a otro proceso al que le otorgará el control de la ejecución. Sólo aquel que posee la *ficha* se considera activo, por tal motivo en cualquier instante durante la ejecución del algoritmo, no hay más que un proceso en dichas condiciones.

En cada sitio, un proceso marca el enlace desde el que recibe el mensaje de activación por vez primera y selecciona un nuevo camino por el que deberá reexpedir la *ficha* para iniciar el algoritmo en otra parte del sistema, luego detiene su ejecución local y espera noticias de ese vecino a quien cedió la acción. Es decir, del proceso con el que comparte el enlace por el que viaja la *ficha*.

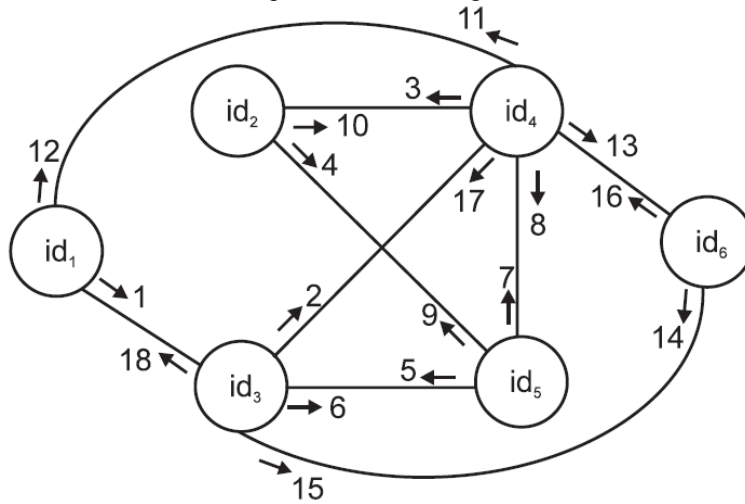
Cuando un proceso no puede retransmitir la *ficha*, ya sea porque no tiene vecinos que visitar o porque ha visitado a todos cuantos podía, entonces envía un nuevo mensaje a través del enlace que tiene marcado, para devolver el control de las operaciones al proceso que le activó, al que denomina *padre*; en este momento da por terminada la ejecución local de su algoritmo. En el otro extremo del enlace, el receptor designa como su *hijo* al vecino que le ha devuelto a la acción. Cada vez que esto sucede el proceso intenta reexpedir la *ficha* para activar a otro vecino; si lo consigue detiene su ejecución nuevamente hasta recibir respuesta, en otro caso, regresa al control a su propio *padre* y termina.

Hay ocasiones en que un proceso se recibe repetido un mensaje de activación, por un enlace distinto al original, desde alguno de sus vecinos que ignora sus condiciones locales. El receptor debe de responder con otro mensaje donde informe el estado de su ejecución y la imposibilidad de que aquel lo designe su *hijo*, puesto que ya hubo otro que lo activó con anterioridad.

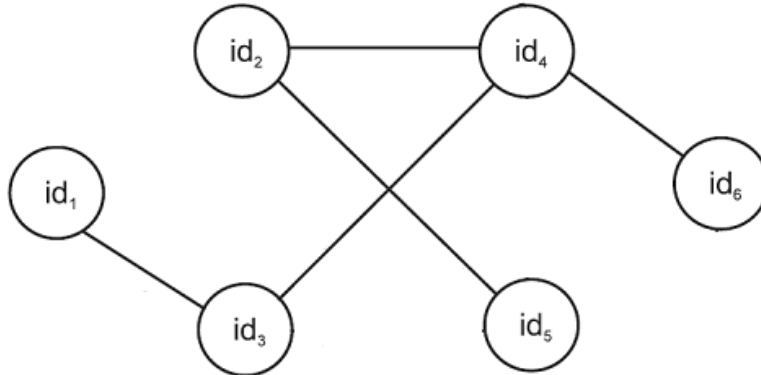
En algún momento, la actividad regresa a *s* y, si no existen más caminos por explorar, entonces finaliza por completo la ejecución. Al terminar, cada proceso está en posibilidad de distinguir a los enlaces que lo comunican con su *padre* y sus *hijos*.



a) Representación de la gráfica



b) Ejecución del algoritmo DFS



c) Árbol generador construido

Figura 4.3 Construcción de un árbol DFS (R. Marcelín, 2004)

CAPÍTULO 4. ALGORITMOS DISTRIBUIDOS

Se han reconocido todos los vértices de la gráfica asociados al sistema y atravesado todas sus aristas. La exploración comienza y termina en el vértice que corresponde a s y que será la raíz del árbol DFS generado. En la figura 4.3b se observa la ejecución del algoritmo DFS, los números que acompañan a las flechas representan el orden de secuencia del evento asociado a la transmisión del mensaje, de igual manera para cada proceso que participa en el sistema se observa la ejecución del algoritmo, con sólo algunas divergencias de carácter local relacionadas, con los identificadores de enlaces de comunicación de los procesos. Al iniciar la ejecución en s , la *ficha* recorre la red, concluyendo en el primer proceso que no encuentra vecinos que visitar. En cada ocasión que un proceso se encuentre con la imposibilidad de seguir recorriendo camino, el control remonta un eslabón de la cadena, con el propósito de buscar una nueva ruta que explorar.

Es importante mencionar el papel que juega cada uno de los procesos que integran el pseudocódigo del algoritmo DFS, (figura 4.4), debido a que estos se comunican entre sí intercambiando los siguientes mensajes.

DESCUBRE; llega a un proceso cuando se le visita por primera vez.

REGRESA; devuelve el centro de actividad al proceso padre.

RECHAZO; respuesta de un proceso al que se visita más de una vez.

Además cada proceso mantiene una colección local de variables:

visitado(i): VERDADERO, si ya se recibió DESCUBRE. Inicialmente, FALSO.

padre(i): El padre de i , en el árbol DFS. Inicialmente, igual a i .

vecinos(i): El conjunto de nodos con los que i comparte una arista.

sin_visitar(i): El conjunto de vecinos de i a los que aún no se les a visitado. Inicialmente, es igual a todos los vecinos de i .

```
< 1>    al recibir DESCUBRE desde el enlace j efectua
< 2>        si visitado(i)
< 3>            entonces envia RECHAZO a j
< 4>                sin_visitar(i) <- sin_visitar(i) - {j}
< 5>            otro    visitado(i) <- VERDADERO
< 6>                padre(i) <- j
< 7>                sin_visitar(i) <- sin_visitar(i) - {j}
< 8>                si existe k en sin_visitar(i)
< 9>                    entonces envia DESCUBRE a k
<10>                        sin_visitar(i) <- sin_visitar(i) - {k}
<11>            otro    si padre(i) == i
<12>                    entonces termina
<13>            otro    envia REGRESA a padre(i)

<14>    al recibir REGRESA o RECHAZO desde el enlace j efectua
<15>        ve a <8>
```

Figura 4.4 Algoritmo DFS (Marcelín, 2004)

IV.2.1 Propiedades del algoritmo DFS

A continuación serán presentados distintos argumentos relacionados con el algoritmo DFS.

Lema 1

Por cada enlace se envía, a lo más, un mensaje en cada dirección.

Por un enlace se envía un mensaje **DESCUBRE** exactamente solo una vez, y en un sólo sentido, debido a que el canal deja de servir para estos efectos. En el otro sentido, se responde por única vez con un mensaje **RECHAZO** ó **REGRESA**, según se trate de un proceso que ya fue visitado, ó sea la primera vez, respectivamente.

Lema 2

Si G es conexa, al terminar el algoritmo cada enlace ha transportado exactamente un mensaje, en cada dirección.

Si llegase a existir un proceso que no cumpliera con el lema, se dice que éste se encuentra comunicado con los otros procesos que ya se han visitado. Por tal motivo el proceso y todos sus posibles descendientes en algún momento serán incorporados al algoritmo.

Lema 3

Para cualquier momento de la ejecución del algoritmo, las aristas $(padre_i, i)$, tales que $i \neq s$, forman una subgráfica acíclica.

La relación de descendencia se establece por el orden de designación. Esto quiere decir que un ancestro se reconoce, e incorpora al algoritmo, primero que cualquiera de sus descendientes. Esto impide que un proceso pueda reconocer como su hijo a otro que ya fue visitado. Con ello se descarta la formación de ciclos, (figura 4.5, indica los tiempos en los que cada proceso ejecuta la instrucción $\langle 9 \rangle$, figura 10).

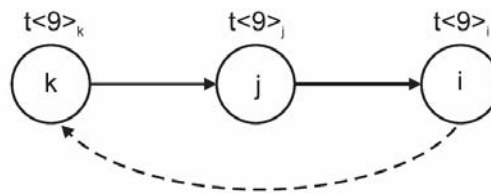


Figura 4.5 Relación de descendencia, fijada por el orden de designación (Marcelín, 2004)

Corolario 1

La estructura resultante que subyace es un árbol generador.

Esto debido a lo planteado en el lema 2, la gráfica es conexa. Además debido al lema 3, las aristas incorporadas forman una gráfica acíclica.

Corolario 2

El algoritmo siempre termina y, si todos los mensajes se entregan con un retardo máximo de una unidad de tiempo, el algoritmo concluye en un plazo $\leq 2m$ y con un costo en mensajes $\leq 2m$.

Un proceso se activa en un instante posterior al momento en que su padre se incorpora a la gráfica y no devuelve el control a su padre hasta haber revisado exhaustivamente, uno tras otro, todos sus enlaces incidentes.

Además se conoce que el algoritmo termina hasta que cada enlace ha transportado un mensaje en cada dirección.

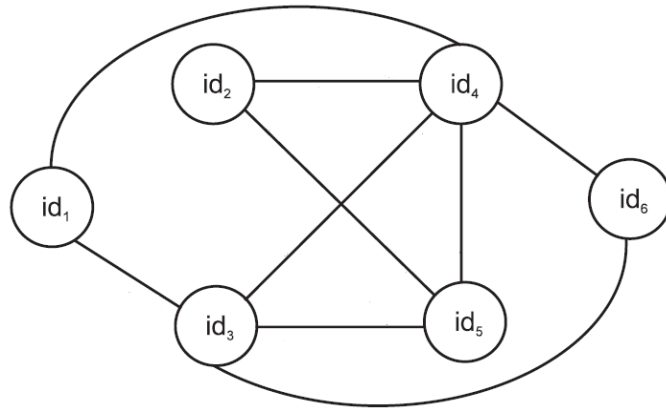
IV.3 Propagación simple

Segall (1983). Considere una red cuya gráfica subyacente es G , en la que existe un proceso s que debe de transmitir un mensaje a los demás sitios del sistema. Para el modelo de sistema con el que se trabaja, sólo se requiere que G sea conexa, esto es, que exista un camino entre cualquier pareja de vértices.

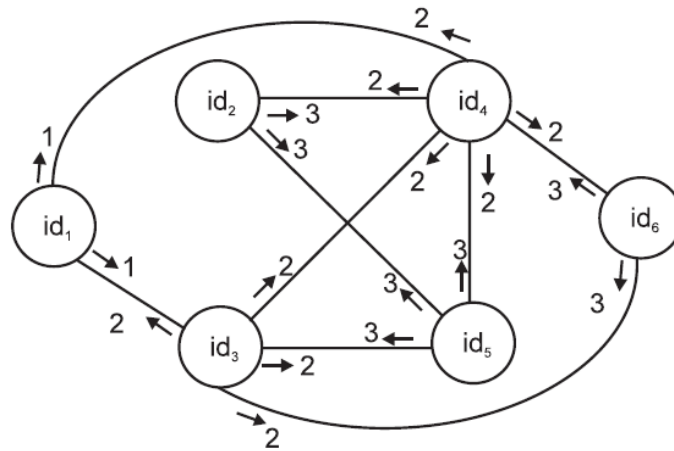
El problema de difusión o propagación, como se le conoce, aparece repetidamente en las operaciones de un sistema distribuido. Para calcular la ruta más corta entre dos sitios arbitrarios, para desarrollar pruebas de conectividad, para reconocer cambios en la topología de la red, el bloque de construcción con el que se resuelven estas tareas es un algoritmo de propagación. Cuando cada proceso que participa en un sistema debe informar a los demás, sobre las condiciones de funcionamiento en el procesador donde reside, nuevamente la solución en un procedimiento de propagación.

Una primera tentativa para la solución del algoritmo de propagación se obtendría modificando el algoritmo de búsqueda en profundidad o en amplitud, para adaptarlo a los requerimientos de propagación. Esta es la lógica del protocolo PI que utiliza la búsqueda en amplitud. Sobre una red en la que se supone no existe un reloj global, s envía su mensaje a cada uno de sus vecinos, estos reciben y reexpiden por todas sus líneas de comunicación. A su vez, los procesos que reciban realizarán exactamente las mismas operaciones.

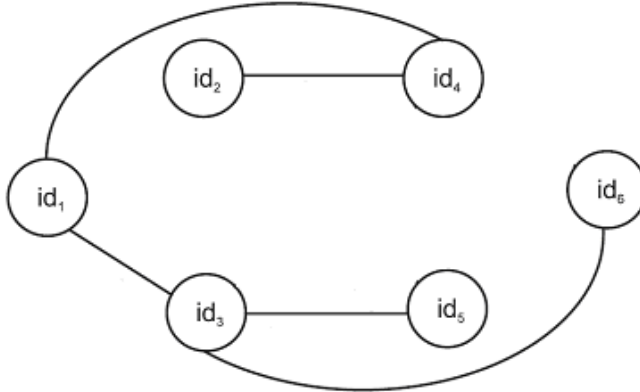
Un proceso da por terminada su ejecución, tan pronto como envía el mensaje a sus vecinos. Es fácil comprobar que la ejecución del algoritmo termina satisfactoriamente y que cualquier proceso acaba recibiendo el mensaje proveniente de s (figura 4.6).



a) Representación de la gráfica



b) Ejecución del algoritmo PI



c) Árbol generador construido

Figura 4.6 Construcción de un árbol PI (Marcelín, 2004)

CAPÍTULO 4. ALGORITMOS DISTRIBUIDOS

En el algoritmo (figura 4.7), que se propone a continuación los participantes intercambian los mensajes siguientes:

M: la ficha que se propaga por la red.

COMIENZA: recibido desde el exterior.

Al mismo tiempo, cada procesador mantiene registros donde se almacena su condición local.

$visitado(i)$: cuyo valor es VERDADERO, si ya ha recibido un mensaje y FALSO de lo contrario.

$padre(i)$: indica al procesador desde el que i recibe a M, por primera vez.

$vecinos(i)$: conjunto de nodos con los que i comparte una arista.

```
<1>    al recibir COMIENZA o M, desde j, efectua
<2>    si visitado(i) == FALSO
<3>    entonces si M entonces padre(i) <- j
<4>    visitado(i) <- VERDADERO
<5>    envia M a todos los vecinos
```

Figura 4.7 Algoritmo PI (Marcelín, 2004)

IV.3.1 Propiedades del algoritmo de propagación simple (PI)

Teorema 1

El algoritmo PI cumple las propiedades siguientes:

- a) *Todos los procesadores conectados a la red, ejecutan <3,...5>, figura 4.6.*
- b) *Cuando el algoritmo concluye, se ha enviado exactamente un mensaje en cada dirección, de cada enlace.*
- c) *La propagación de la información es lo más rápida posible en el siguiente sentido:*

$\forall (i, j) \in E$, sea ω_{ij} el retardo de la transmisión del mensaje enviado de i a j . Por tal motivo, el conjunto de aristas $\{(padre_i, i), \forall i \in V, i \neq s\}$, forma un árbol de pesos mínimos para G .

- a. s envía un mensaje M a cada vecino, ellos dependiendo de sus condiciones iniciales, ejecutan las instrucciones <3,...,5>, en sus respectivos sitios y por única vez. Supóngase que existen un procesador i conectado a la red que aún no ejecuta esta secuencia de operaciones, mientras que en el camino que lo une con s , todos los procesadores que lo proceden ya han completado el algoritmo. Esto quiere decir que

tiene un vecino que le ha enviado un mensaje y, como será la primera vez que se le visita, finalmente ejecutará $\langle 3, \dots, 5 \rangle$ también.

- b. Todo procesador i que recibe M , reexpide una copia de éste a sus vecinos, incluyendo al procesador de quien recibe por primera vez. En su momento, los procesadores que reciben este mensaje devolverán a i una copia de M , ya sea como una respuesta a quien consideran su padre, ó como reacción al mensaje enviado desde otro procesador. En todo caso, se observa al mensaje M transitar una vez en cada sentido, por todas las aristas de i .
- c. Por inducción sobre la altura del árbol construido. Para la raíz del nivel 0 (la raíz s), es evidente que se cumple la hipótesis, si se considera que la distancia de s a él mismo es 0. Ahora, se supone que se cumple para los vértices del árbol hasta el nivel n . Entonces, sea i un procesador de este nivel que envía M hasta un procesador j , que no pertenece al árbol, j será hijo de i siempre que no exista un procesador i' (en el mismo nivel que i) quien haya reclamado antes la “paternidad” de j , a través de una arista (i', j) , tal que $\omega(i', j) < \omega(i, j)$. Se concluye que los procesadores en el nivel $n + 1$ también quedan incorporados al árbol, de acuerdo con el criterio de peso mínimo.

Capítulo 5

INSTRUMENTACIÓN ÓPTIMA DE UN MARCO PLANO

En este capítulo serán presentados los resultados obtenidos al implementar el algoritmo de instrumentación propuesto por Cherng (2003), a un marco plano.

Al implementar esa metodología, se estudiará su comportamiento ante diferentes arreglos de instrumentación en una misma estructura con la finalidad de encontrar un arreglo óptimo. Para ello se utilizará un modelo de marco plano, discretizado de cuatro maneras distintas.

Se propone una metodología de instrumentación. Esta se basa en las características de la estructura, la configuración y propiedades dinámicas. La instrumentación óptima estará definida en función de las formas modales que se requiera monitorear así, como del grado de precisión requerido.

V. 1 Metodología de instrumentación

A continuación se presenta una metodología para la implementación del algoritmo propuesto por Cherng (2003).

Para lograr la instrumentación óptima de sistemas estructurales es necesario aplicar una serie de pasos descritos en el organigrama de la figura 5.1.

Estructuración; en esta etapa es importante que el ingeniero reconozca el tipo de elementos que componen a la estructura, teniendo en cuenta la configuración de la misma (armaduras, cables, arcos, marcos, bóvedas y estructuras espaciales, entre muchos otros), debido a que es necesario el cálculo de las matrices de rigidez y masa.

Propiedades de los elementos estructurales; durante esta etapa se calculan las propiedades geométricas de las secciones (área, inercia). También, se calcula el módulo de elasticidad y la densidad del material con el que se construyó la estructura.

Propiedades intrínsecas de la estructura; esta etapa es fundamental debido a que proporciona los datos requeridos por el algoritmo LG-BHM, dichos resultados se condensan en las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento.

Las matrices de masa y rigidez pueden calcularse mediante la implantación del método de rigideces. La matriz de amortiguamiento puede calcularse aplicando la metodología de Rayleigh o cualquier otro procedimiento que brinde resultados razonables.

Parámetros dinámicos; al llegar a este paso, ya se cuenta con las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento, se procede a resolver el sistema de ecuaciones diferenciales con múltiples grados de libertad con el propósito de obtener las formas modales y frecuencias fundamentales de la estructura.

Instrumentación óptima de la estructura; en esta fase se aplicará la metodología LG-BHM con base en el número de formas modales de interés. En un principio se ubicarán sensores en cada grado de libertad de la estructura, posteriormente el método ponderará en que grado de libertad es necesario colocar un sensor.

Antes de instrumentar una estructura se debe tener claro los parámetros que se desea monitorear. La metodología descrita en el organigrama fue utilizada en este proyecto con buenos resultados, no obstante, si está se quiere aplicar a cualquier otro tipo de estructura, con la finalidad de monitorear otro parámetro, debe adecuarse a cada caso particular.

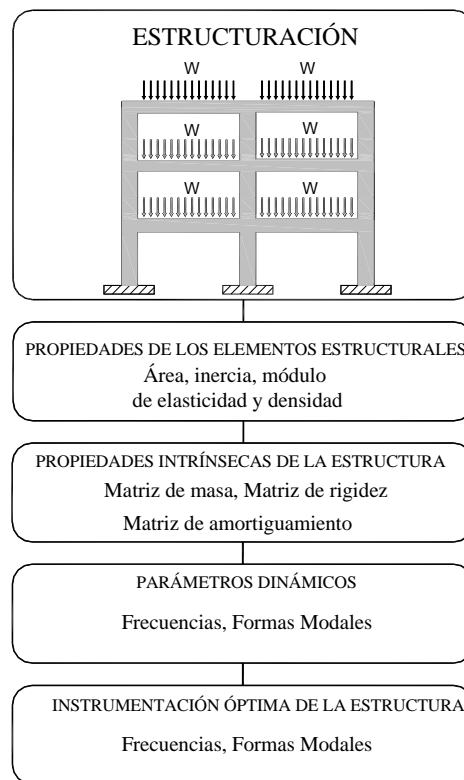


Figura 5.1 Organigrama del la metodología de instrumentación

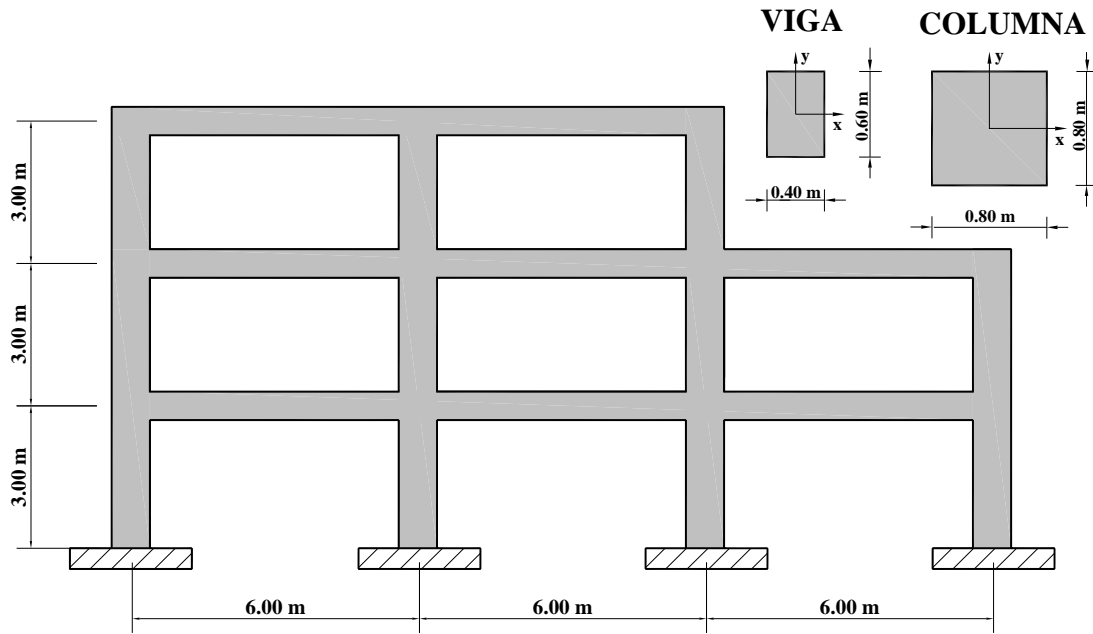
V. 2 Implantación de la metodología de instrumentación

Por sencillez, en este trabajo se optó por estudiar un marco plano. En trabajos futuros se realizarán estudios en marcos tridimensionales.

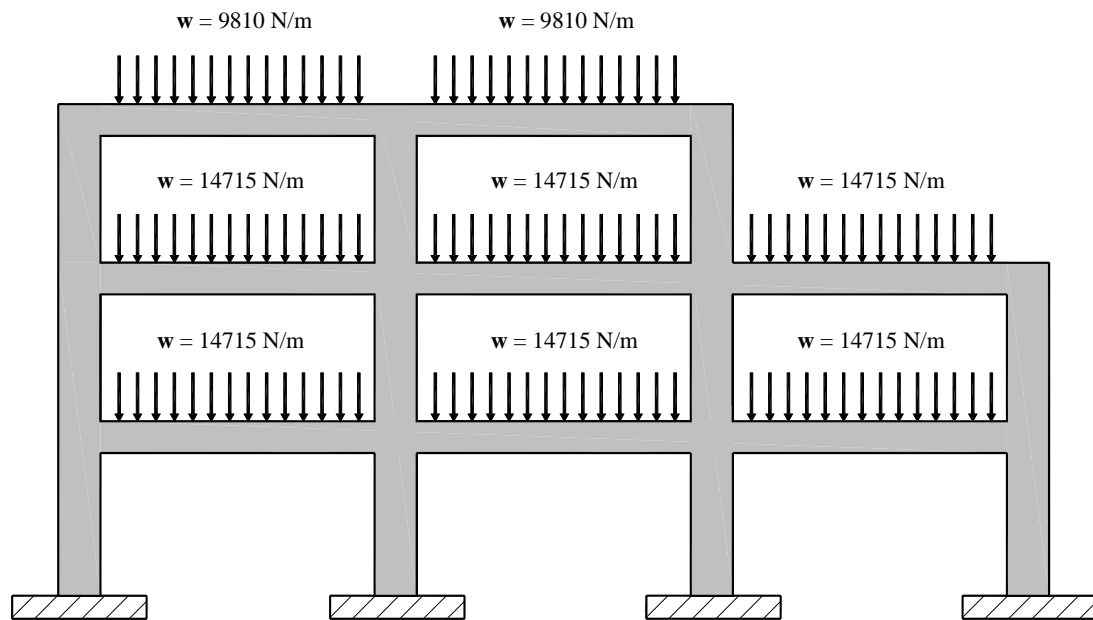
A continuación se presentará la metodología presentada en la figura 5.1 aplicada en un marco plano.

V. 2.1 Estructuración

El marco utilizado en este trabajo cuenta con tres crujeías y dos niveles, el material propuesto para la estructura es concreto de $f'c = 25 \text{ MPa}$ ($f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$), las columnas son de sección transversal cuadrada y las vigas son de sección rectangular (figura 5.2a). Las cargas transmitidas a las vigas por la losa se muestran en la (figura 5.2b). La nomenclatura utilizada para nombrar al marco es E2^[1].



a) Estructuración



b) Cargas actuantes

Figura 5.2 Estructuración del marco "E2"

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTACIÓN ÓPTIMA DEL MARCO PLANO

V. 2.2 Propiedades de los elementos estructurales

Las propiedades de las secciones que integran al marco E2 se muestran en la tabla 5.1, el peso volumétrico y módulo de elasticidad se obtienen con base en lo propuesto en las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-Concreto 1.5.1 y NTC-Concreto 1.5.1.4 respectivamente), para un concreto clase 1 con un $f'c = 25$ MPa.

Tabla 5.1 Propiedades de los elementos estructurales

Elemento	Área [m ²]	Inercia-x [m ⁴]	Módulo de Elasticidad [MPa]	Peso Volumétrico [N/m ³]
Columna	0.64	0.0341	22000	22000
Viga	0.24	0.0072	22000	22000

V. 2.3 Propiedades intrínsecas de la estructura

Para el cálculo de las matrices de masa y rigidez, fue necesario implantar el método de las rigideces. El método fue programado en Matlab.

La discretización de la estructura es fundamental en la instrumentación óptima de sistemas estructurales. Cada grado de libertad modelado en la estructura es candidato a tener colocado un sensor que monitoree su comportamiento. Para cada nodo modelado en el marco plano corresponden tres grados de libertad, por tal motivo éste puede tener hasta 3 sensores, S_X , S_Y y M_θ ^[2], éstos registraran el comportamiento del nodo en la dirección horizontal, vertical y rotacional respectivamente.

En este trabajo el marco E2, fue discretizado de cuatro maneras diferentes. En la tabla 5.2, se presenta la nomenclatura correspondiente para cada marco.

Tabla 5.2 Nomenclatura del marco “E2”

Marco	Grados de libertad
E2-33	33
E2-90	90
E2-147	147
E2-204	204

^[1] Se denomina marco E2 debido a que lo antecede un marco de una sola crujía y dos niveles (E1), al que debido a su sencillez sólo se le utilizó para calibrar las herramientas utilizadas, mas no se incluyen los resultados obtenidos.

^[2] Los sensores M_θ , se descartan de la instrumentación final de cada marco estudiado en el proyecto (tabla 5.2), debido a que a pesar de estar disponibles, en el mercado son poco utilizados.

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTACIÓN ÓPTIMA DEL MARCO PLANO

A continuación será presentada la discretización realizada a los marcos descritos anteriormente (figuras 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6).

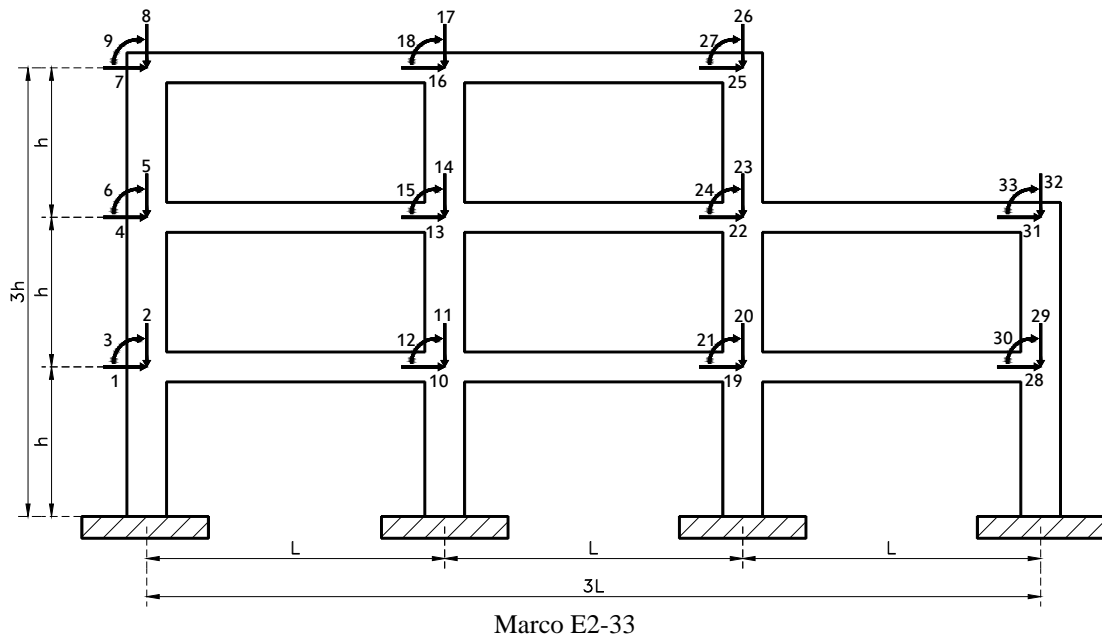


Figura 5.3 Discretización con 33 grados de libertad

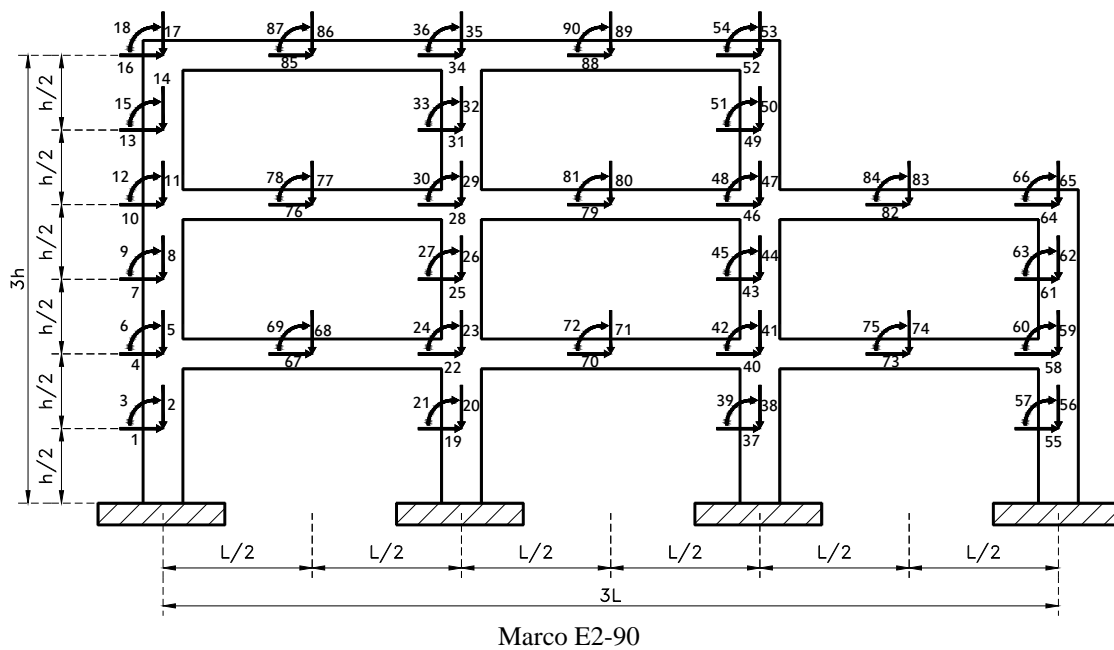


Figura 5.4 Discretización con 90 grados de libertad

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTACIÓN ÓPTIMA DEL MARCO PLANO

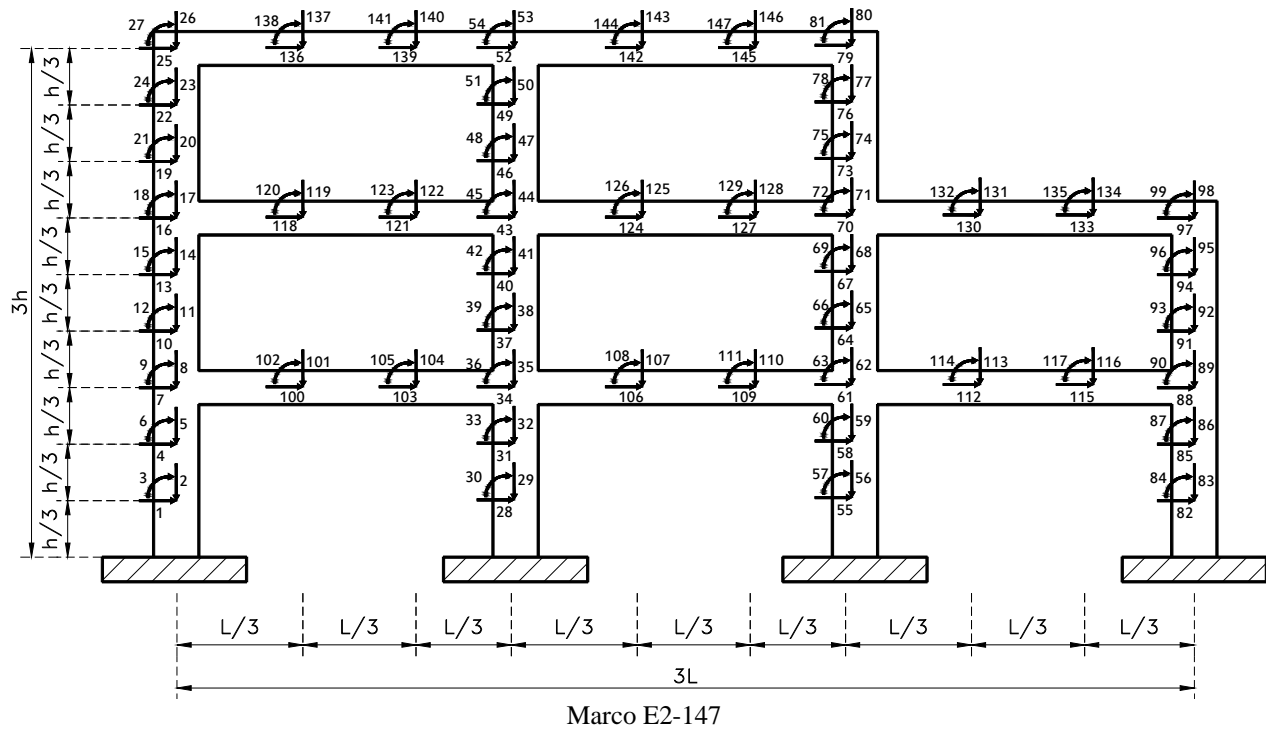


Figura 5.5 Discretización con 147 grados de libertad

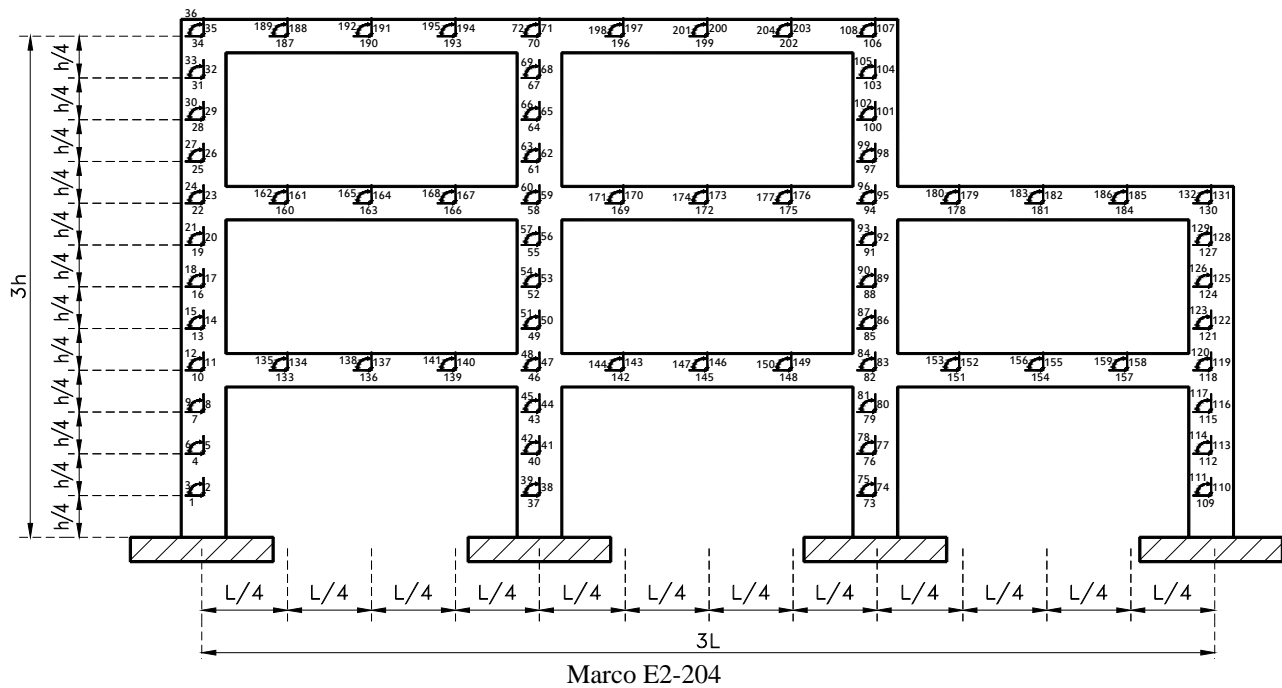


Figura 5.6 Discretización con 204 grados de libertad

V. 2.4 Parámetros dinámicos

A continuación se presentan los parámetros dinámicos de los marcos E2-33, E2-90, E2-147 y E2-204.

Las características dinámicas calculadas son las formas modales y frecuencia naturales del sistema estructural, debido a que las metodologías de instrumentación LG y BHM, requieren estos parámetros.

Para los cuatro casos estudiados en el marco E2, fueron obtenidas las formas modales correspondientes a cada grado de libertad propuesto en la discretización, (por ejemplo para el marco E2-33 se obtienen treinta y tres formas modales). En este trabajo sólo se consideraron las primeras cinco formas modales, debido a que desde un punto de vista práctico éstas caracterizan de una manera razonable el marco plano estudiado.

V. 2.4.1 Parámetros dinámicos E2-33

A continuación son presentadas las formas modales y frecuencias fundamentales para el marco E2-33.

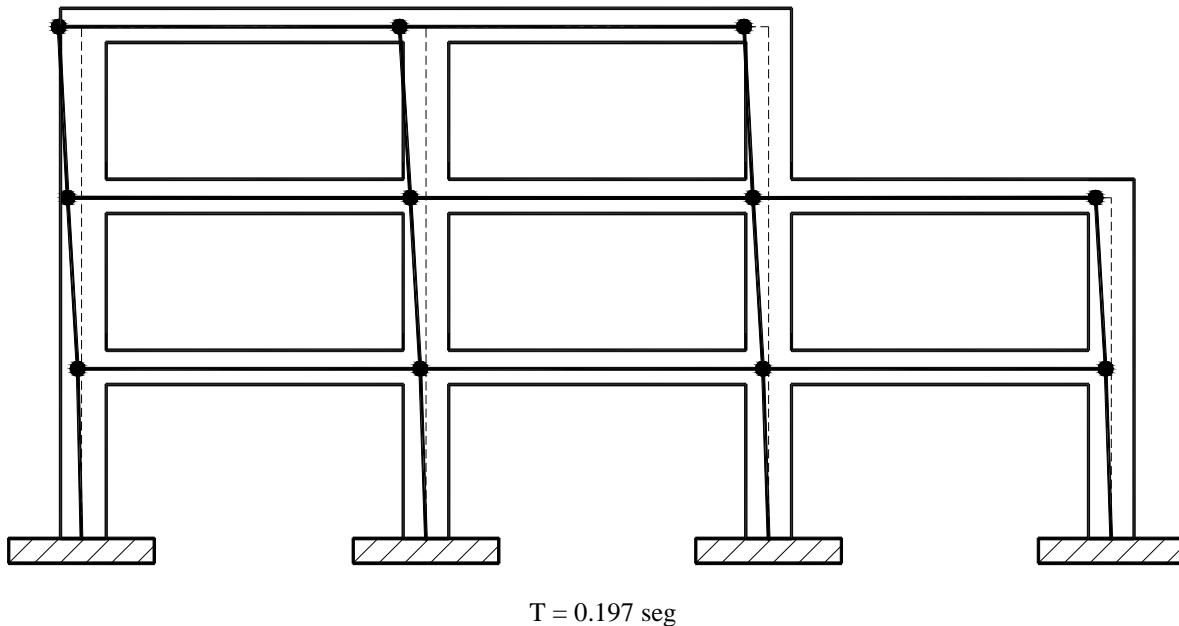


Figura 5.7 Primer modo de E2-33

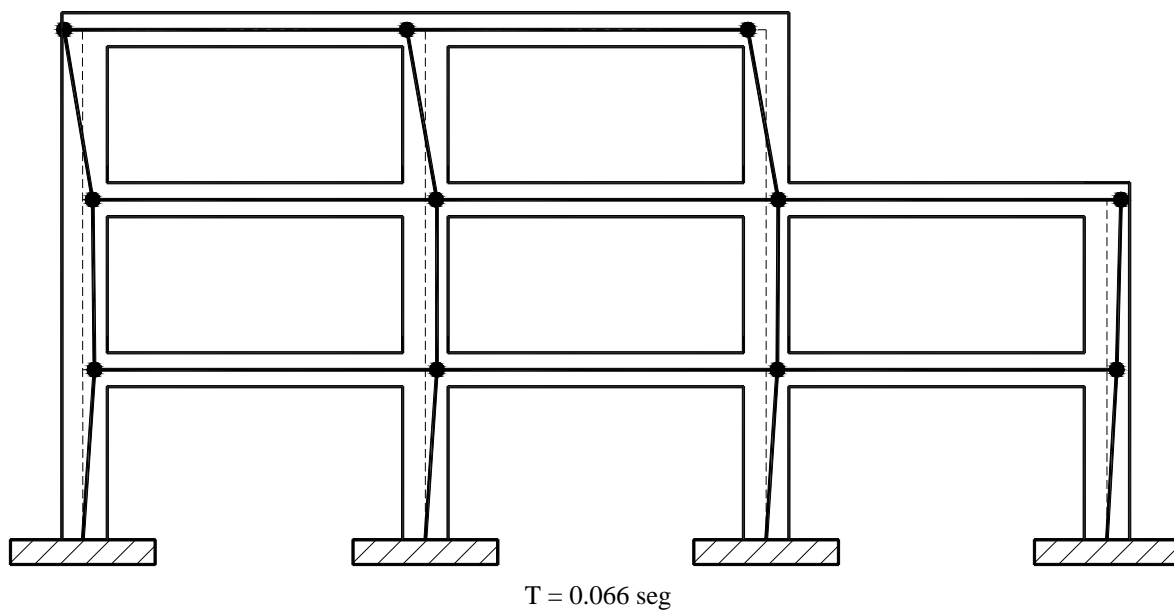


Figura 5.8 Segundo de modo E2-33

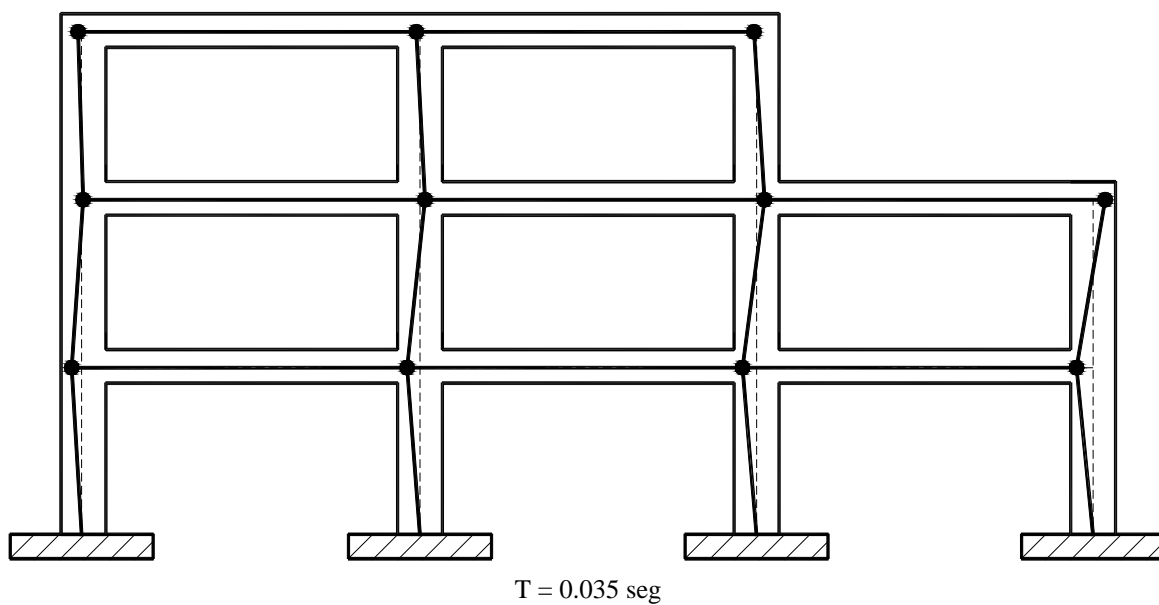


Figura 5.9 Tercer de modo E2-33

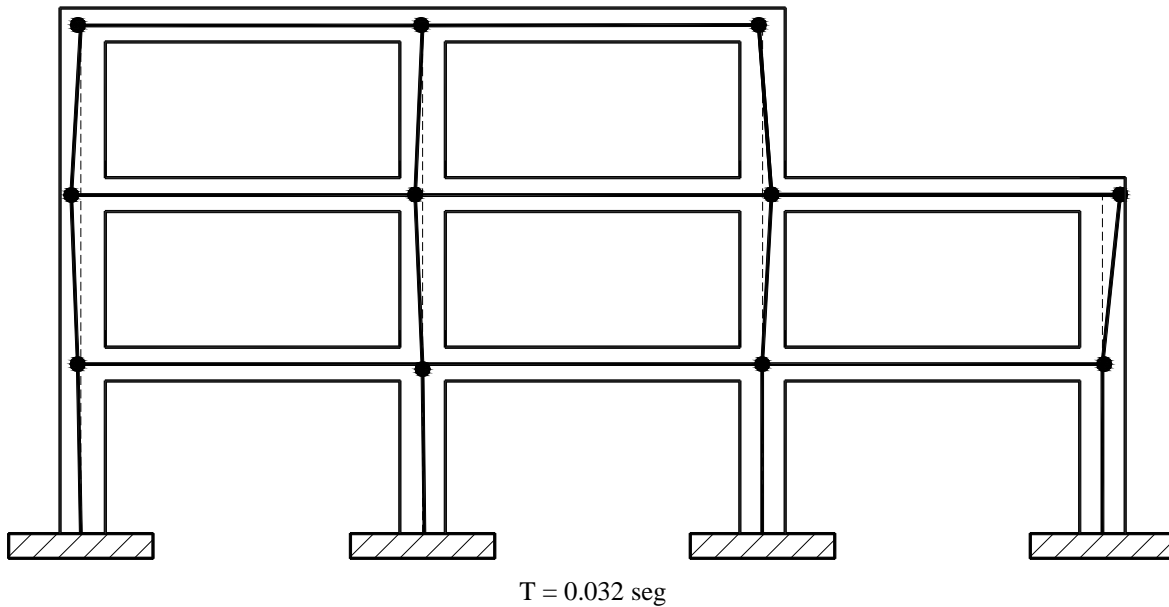


Figura 5.10 Cuarto de modo E2-33

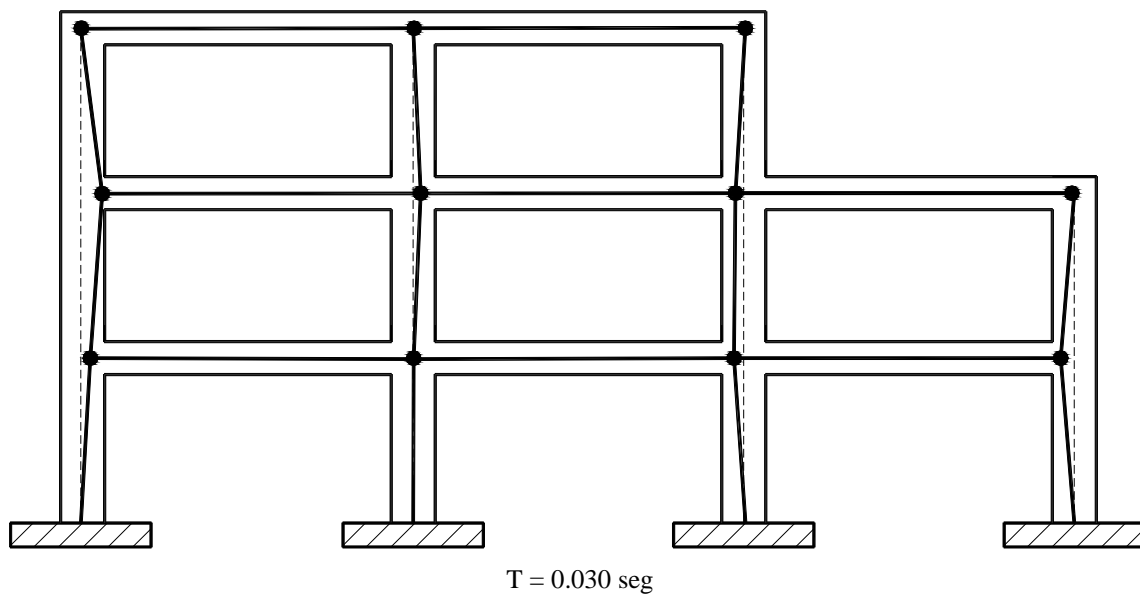


Figura 5.11 Quinto modo de E2-33

V. 2.4.2 Parámetros dinámicos E2-90

A continuación son presentadas las formas modales y frecuencias fundamentales para el marco E2-90.

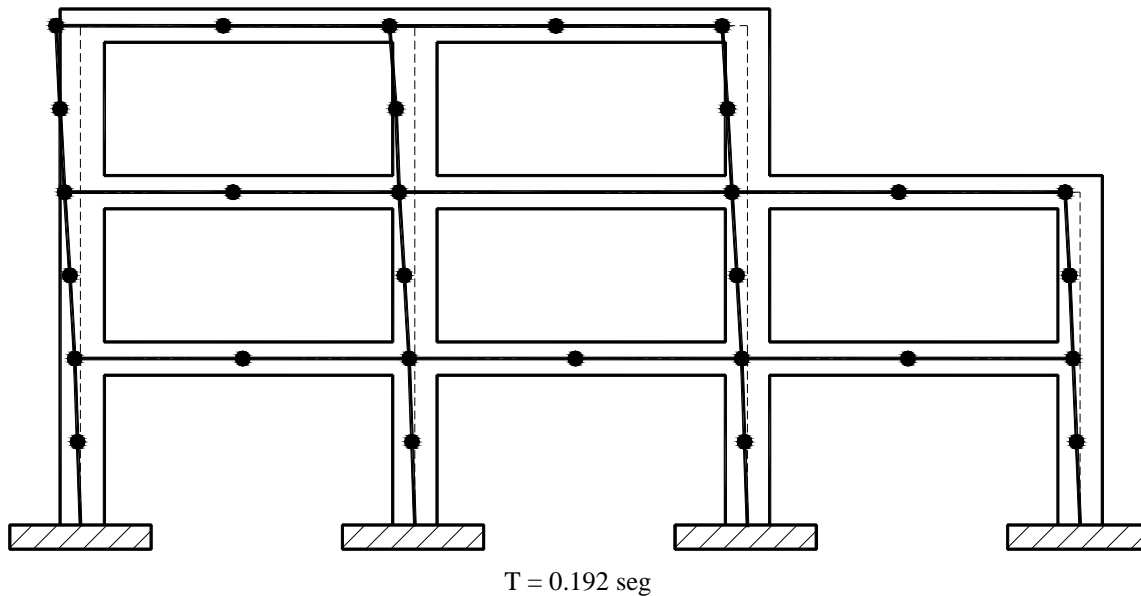


Figura 5.12 Primer modo de E2-90

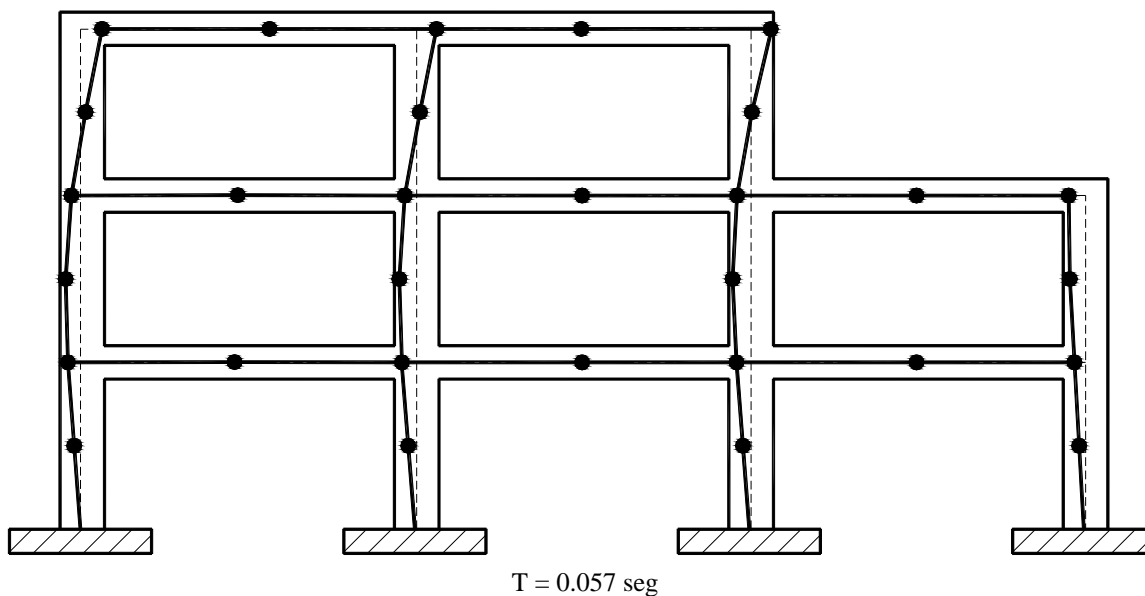


Figura 5.13 Segundo modo de E2-90.

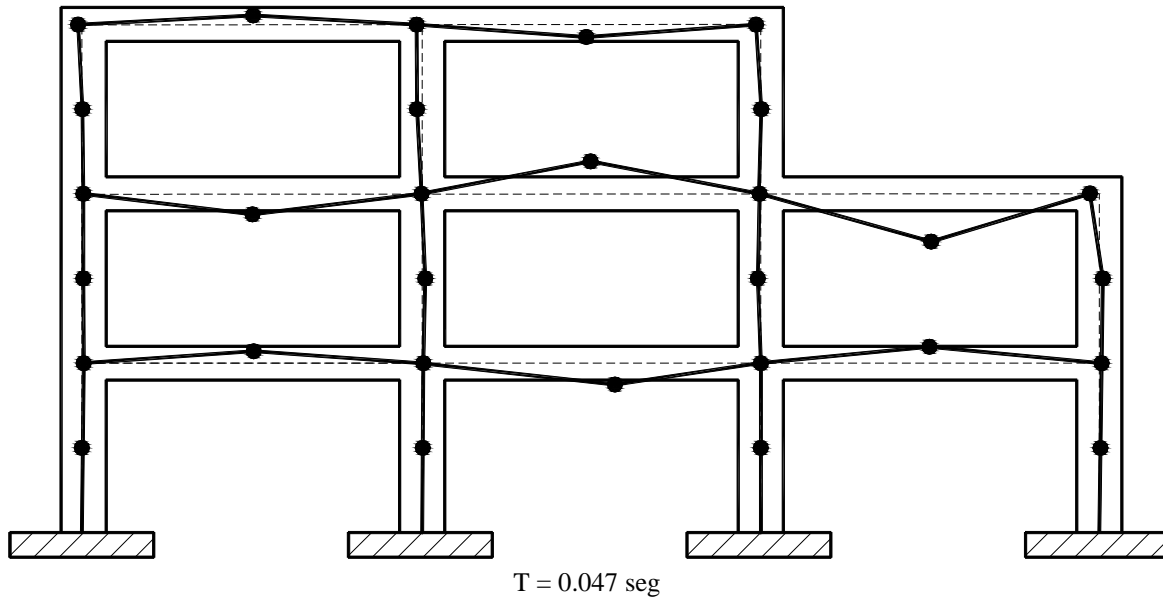


Figura 5.14 Tercer modo de E2-90

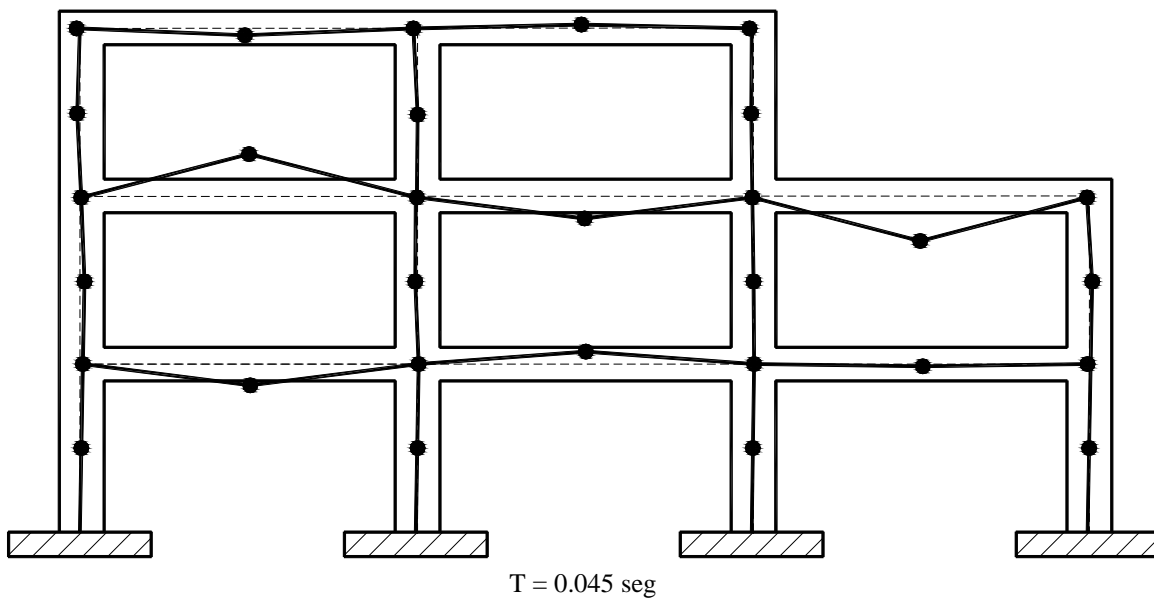


Figura 5.15 Cuarto modo de E2-90

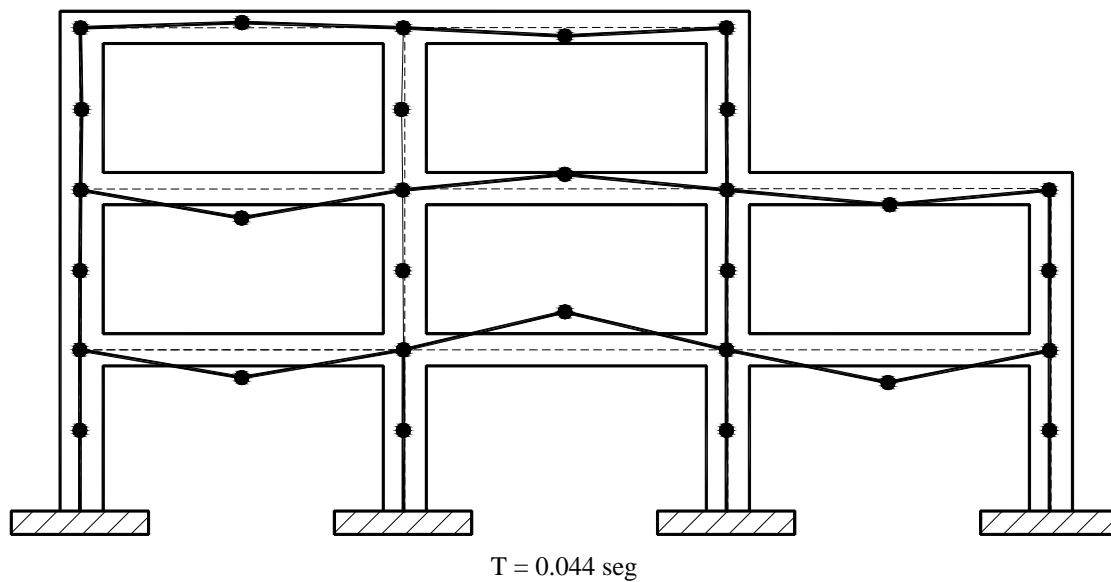


Figura 5.16 Quinto modo de E2-90.

V. 2.4.3 Parámetros dinámicos E2-147

A continuación son presentadas las formas modales y frecuencias fundamentales para el marco E2-147.

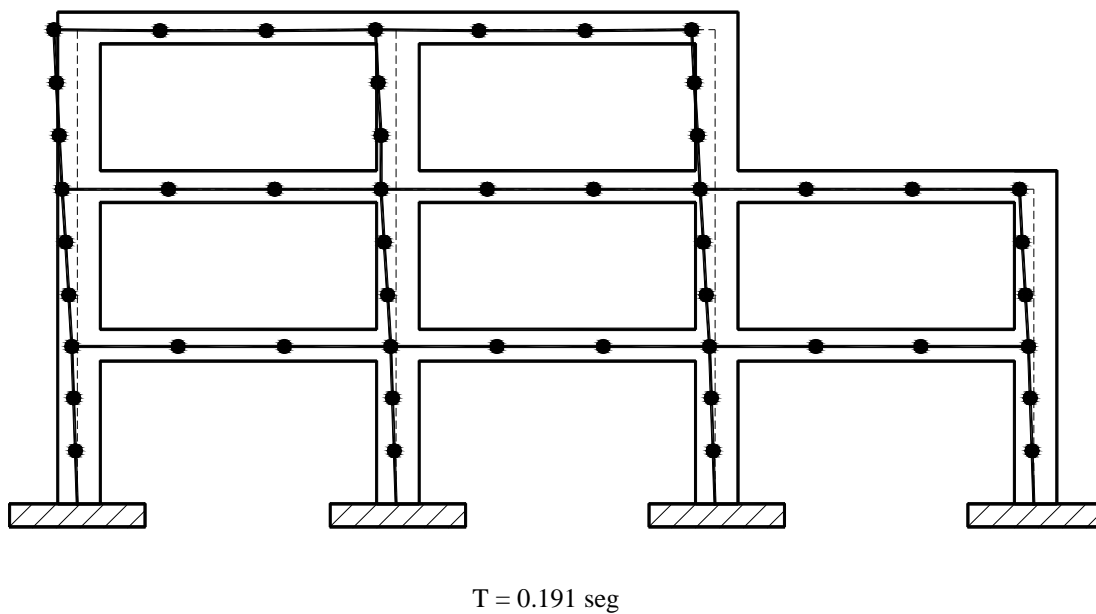


Figura 5.17 Primer modo de E2-147

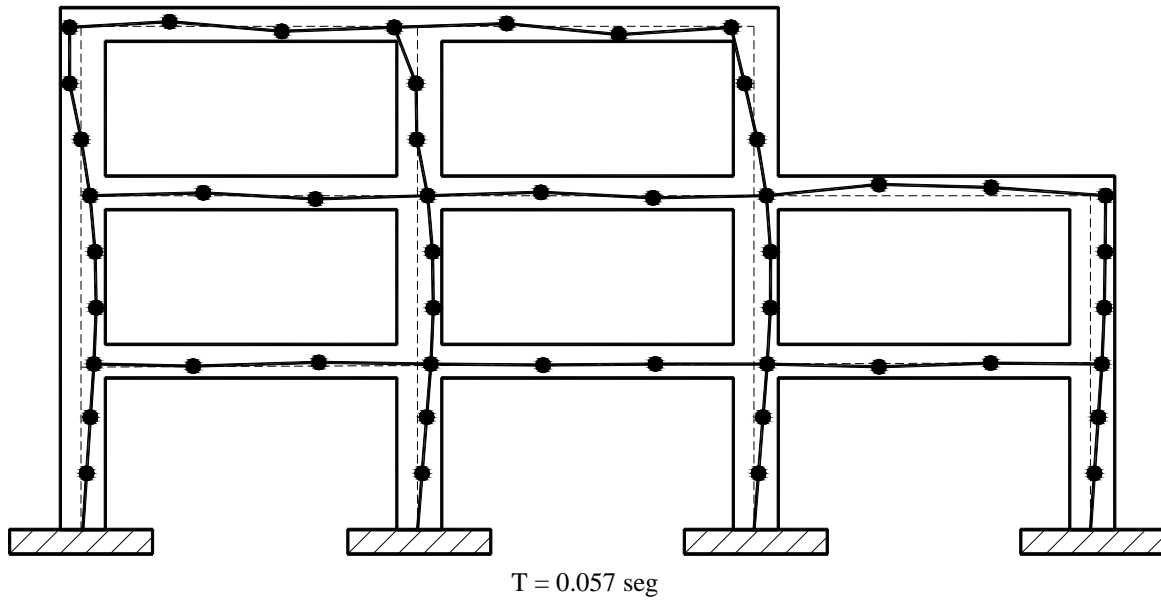


Figura 5.18 Segundo modo de E2-147

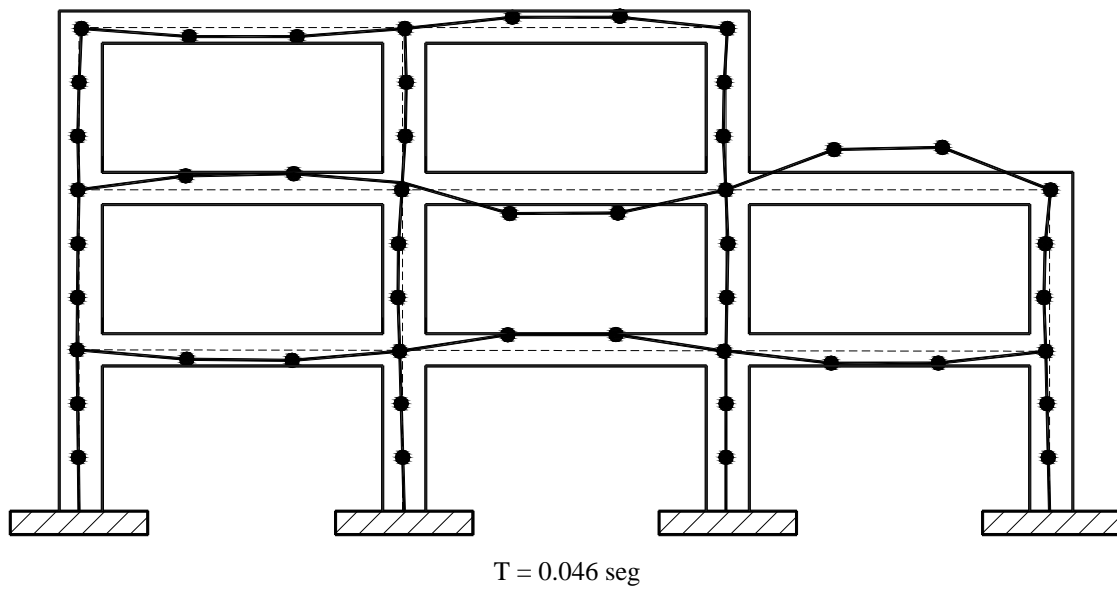
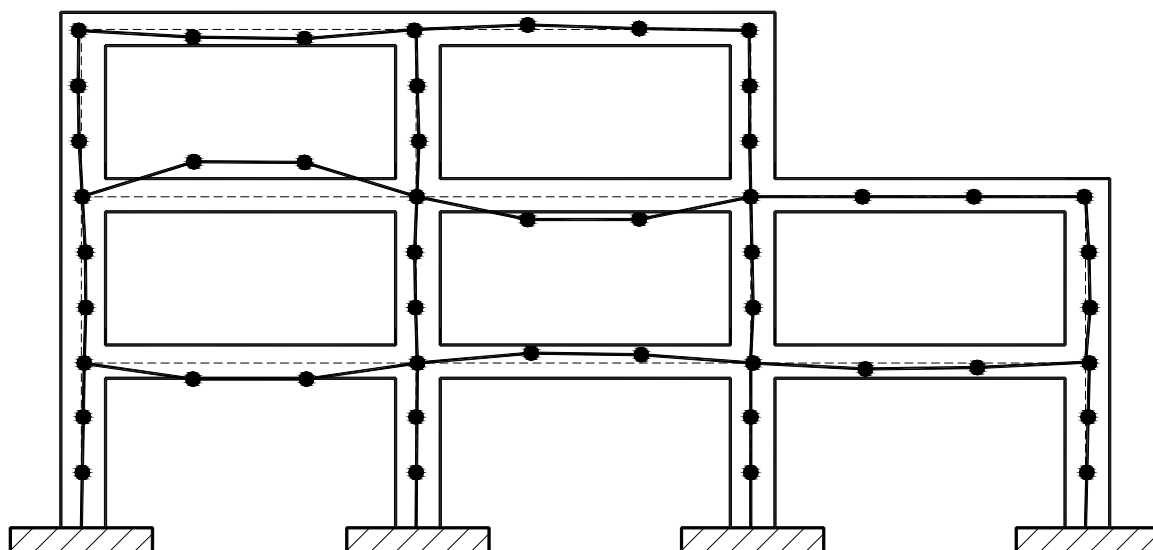
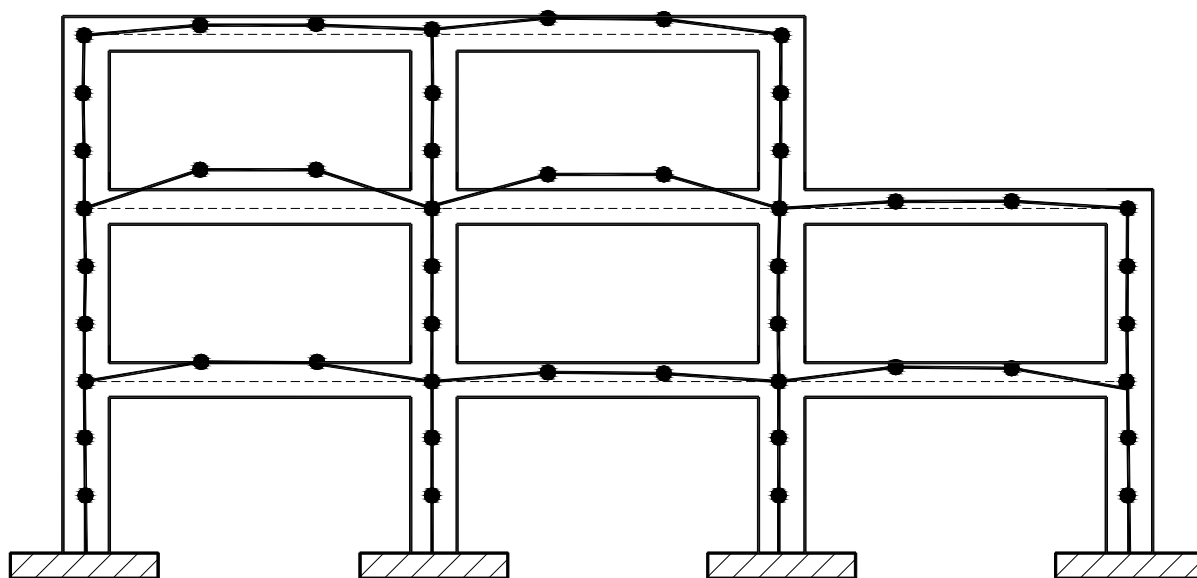


Figura 5.19 Tercer modo de E2-147



$T = 0.045 \text{ seg}$

Figura 5.20 Cuarto modo de E2-147

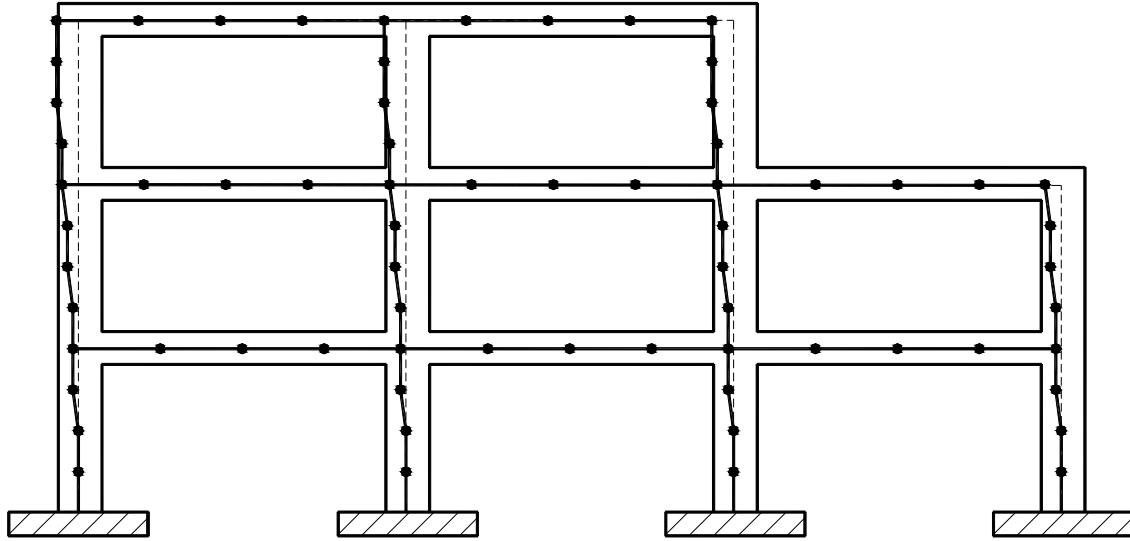


$T = 0.044 \text{ seg}$

Figura 5.21 Quinto modo de E2-147

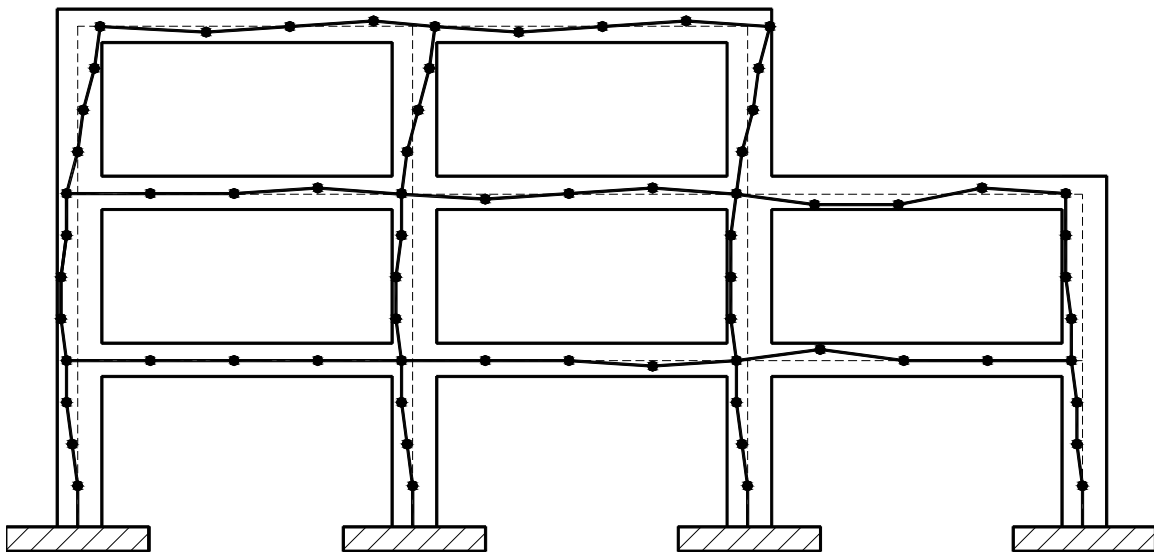
V. 2.4.4 Parámetros dinámicos E2-204

A continuación son presentadas las formas modales y frecuencias fundamentales para el marco E2-204.



$T = 0.194 \text{ seg}$

Figura 5.22 Primer modo de E2-204



$T = 0.056 \text{ seg}$

Figura 5.23 Segundo modo de E2-204

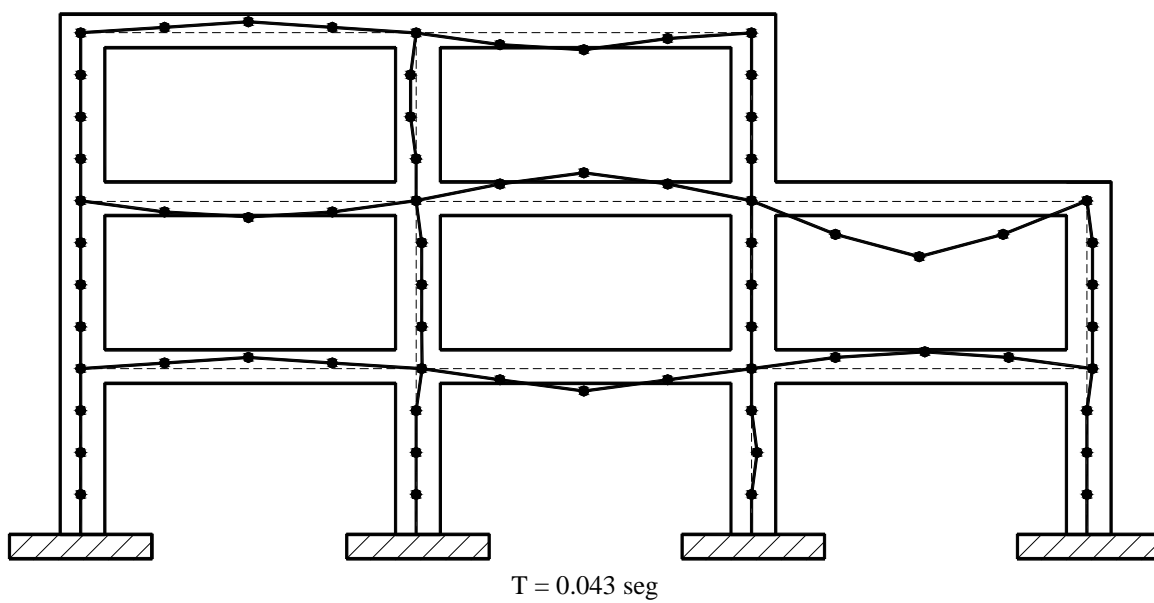


Figura 5.24 Tercer modo de E2-204

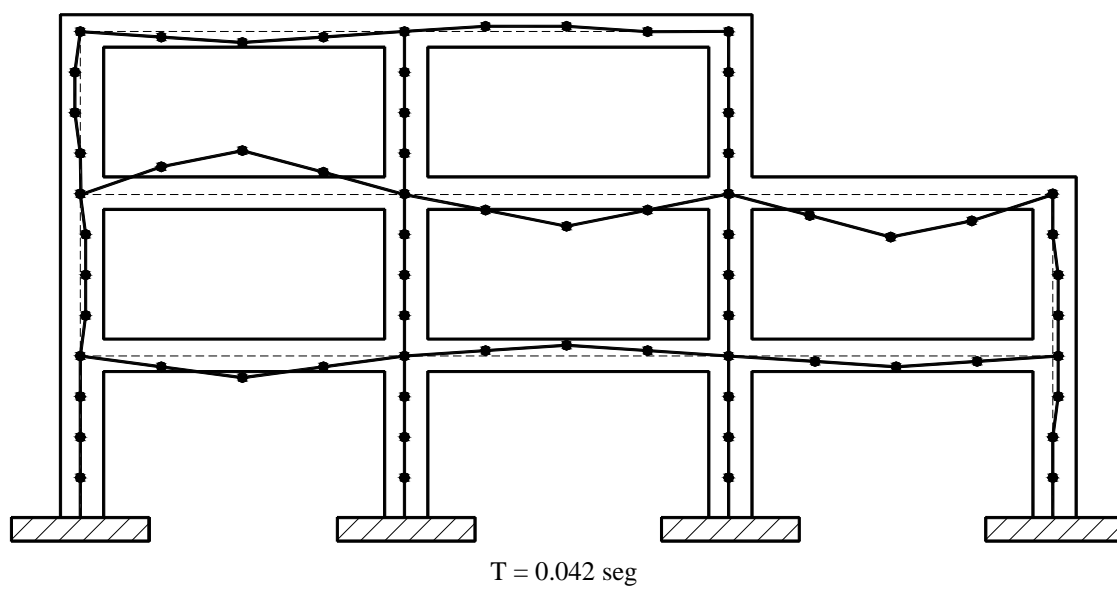


Figura 5.25 Cuarto modo de E2-204

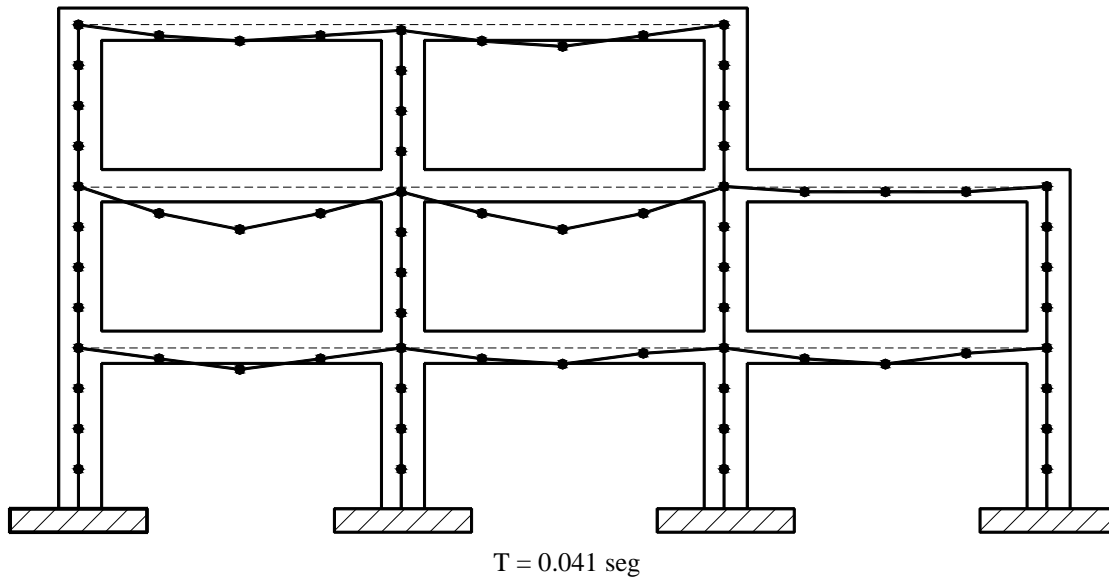


Figura 5.26 Quinto modo de E2-204

V. 2.5 Instrumentación óptima de los marcos planos

A continuación se revisaran las distintas propuestas de instrumentación de los marcos E2-33, E2-90, E2-147 y E2-204.

V. 2.5.1 Cálculo de la instrumentación para el marco E2-33

En la tabla 5.3^[3], se observa la aportación que tiene cada sensor en el monitoreo global de los primeras cinco formas modales.

Tabla 5.3 Aportaciones correspondientes a los S_x , para las primeras cinco formas modales del marco E2-33

Grado de Libertad	MODO 1	MODO 2	MODO 3	MODO 4	MODO 5	Σ_{CGL}
4	0.0821	0.0380	0.0011	0.0604	0.1981	0.3797
7	0.2026	0.1322	0.0054	0.0042	0.0061	0.3505
10	0.0106	0.0518	0.0806	0.0001	0.0094	0.1526
13	0.0822	0.0442	0.0122	0.0284	0.0281	0.1950
16	0.2017	0.1329	0.0067	0.0009	0.0000	0.3422
19	0.0106	0.0492	0.0957	0.0001	0.0424	0.1980
22	0.0804	0.0573	0.0311	0.0421	0.0332	0.2442
25	0.2013	0.1284	0.0032	0.0073	0.0024	0.3426
28	0.0104	0.0373	0.1330	0.0036	0.0890	0.2733
31	0.0784	0.0772	0.0712	0.1632	0.1244	0.5143
$\Sigma_{\text{Contribución}}$	0.96	0.75	0.44	0.31	0.53	2.9924

^[3] Para una descripción amplia de cómo se obtuvieron los valores de la tabla 5.3, consultar el apéndice A.

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTACIÓN ÓPTIMA DEL MARCO PLANO

En la figura 5.27, se muestra el arreglo y la orientación, que ocuparían los sensores para la propuesta de instrumentación analizada en el marco E2-33^[4].

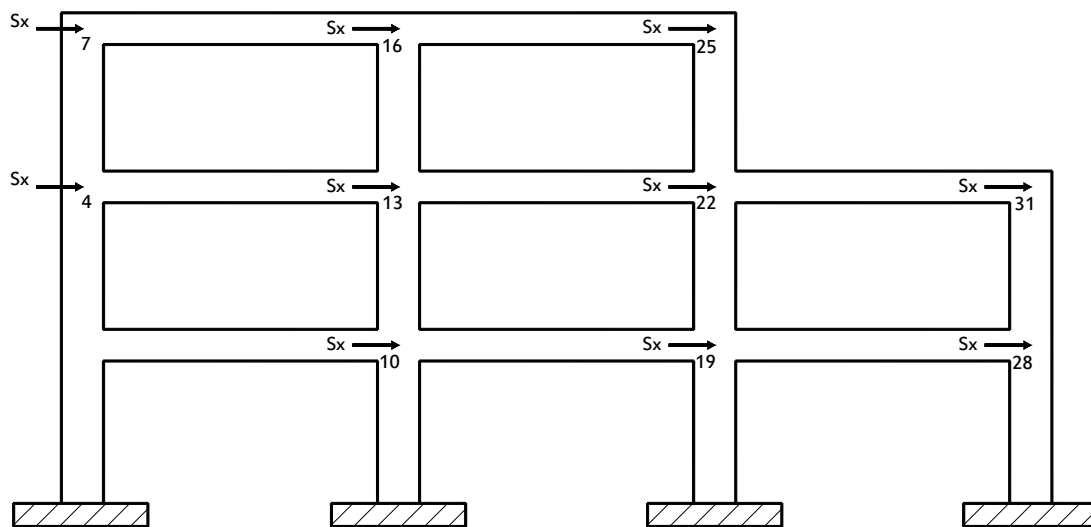


Figura 5.27 Arreglo y orientación de los sensores en el marco E2-33

V. 2.5.2 Cálculo de la instrumentación para el marco E2-90

En las tablas 5.4 y 5.5, se observa la aportación que tiene cada sensor, en el monitoreo global de los primeras cinco formas modales.

Tabla 5.4 Aportaciones correspondientes a los S_Y , para las primeras cinco formas modales del marco E2-90

Grado de Libertad	MODO 1	MODO 2	MODO 3	MODO 4	MODO 5	Σ_{CGL}
68	0.0000	0.0000	0.0274	0.0886	0.1677	0.2837
71	0.0000	0.0002	0.0871	0.0303	0.3130	0.4306
74	0.0000	0.0002	0.0538	0.0009	0.2376	0.2925
77	0.0000	0.0000	0.0805	0.3519	0.1706	0.6031
80	0.0000	0.0001	0.2011	0.0867	0.0547	0.3427
83	0.0000	0.0241	0.4409	0.3727	0.0229	0.8606
86	0.0000	0.0002	0.0164	0.0092	0.0061	0.0318
89	0.0000	0.0011	0.0290	0.0029	0.0146	0.0476
$\Sigma_{Contribución}$	0.00	0.03	0.94	0.94	0.99	2.8926

^[4] Los S_X y S_Y que no aparecen en el arreglo final correspondiente a E2-33, es porque aportan menos del 0.001% de la respuesta por lo menos para los cinco modos estudiados en este trabajo, excluyendo los M_θ .

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTACIÓN ÓPTIMA DEL MARCO PLANO

Tabla 5.5 Aportaciones correspondientes a los S_x , para las primeras cinco formas modales del marco E2-90

Grado de Libertad	MODO 1	MODO 2	MODO 3	MODO 4	MODO 5	Σ_{CGL}
4	0.0047	0.0222	0.0008	0.0017	0.0000	0.0295
7	0.0166	0.0308	0.0004	0.0042	0.0000	0.0521
10	0.0364	0.0118	0.0004	0.0003	0.0000	0.0489
13	0.0609	0.0035	0.0001	0.0015	0.0004	0.0663
16	0.0878	0.0707	0.0016	0.0021	0.0000	0.1622
22	0.0048	0.0240	0.0017	0.0006	0.0000	0.0310
25	0.0167	0.0339	0.0045	0.0001	0.0001	0.0552
28	0.0364	0.0144	0.0002	0.0002	0.0001	0.0514
31	0.0612	0.0035	0.0022	0.0007	0.0007	0.0682
34	0.0874	0.0708	0.0015	0.0011	0.0000	0.1609
40	0.0048	0.0233	0.0007	0.0012	0.0000	0.0299
43	0.0165	0.0393	0.0003	0.0007	0.0003	0.0571
46	0.0356	0.0214	0.0001	0.0001	0.0001	0.0573
49	0.0593	0.0010	0.0011	0.0000	0.0002	0.0616
52	0.0872	0.0683	0.0007	0.0009	0.0000	0.1572
61	0.0162	0.0274	0.0055	0.0042	0.0001	0.0532
64	0.0346	0.0319	0.0000	0.0001	0.0000	0.0667
67	0.0048	0.0241	0.0013	0.0011	0.0000	0.0313
70	0.0048	0.0247	0.0012	0.0009	0.0000	0.0316
73	0.0048	0.0211	0.0017	0.0021	0.0000	0.0296
76	0.0365	0.0136	0.0003	0.0003	0.0000	0.0508
79	0.0361	0.0185	0.0002	0.0002	0.0000	0.0550
82	0.0353	0.0276	0.0000	0.0000	0.0000	0.0628
85	0.0879	0.0731	0.0016	0.0016	0.0000	0.1642
88	0.0876	0.0719	0.0012	0.0011	0.0000	0.1616
$\Sigma_{Contribución}$	0.96	0.77	0.03	0.03	0.00	1.7957

En la figura 5.28, se muestra el arreglo y la orientación, que ocuparían los sensores para la propuesta de instrumentación analizada en el marco E2-90^[5].

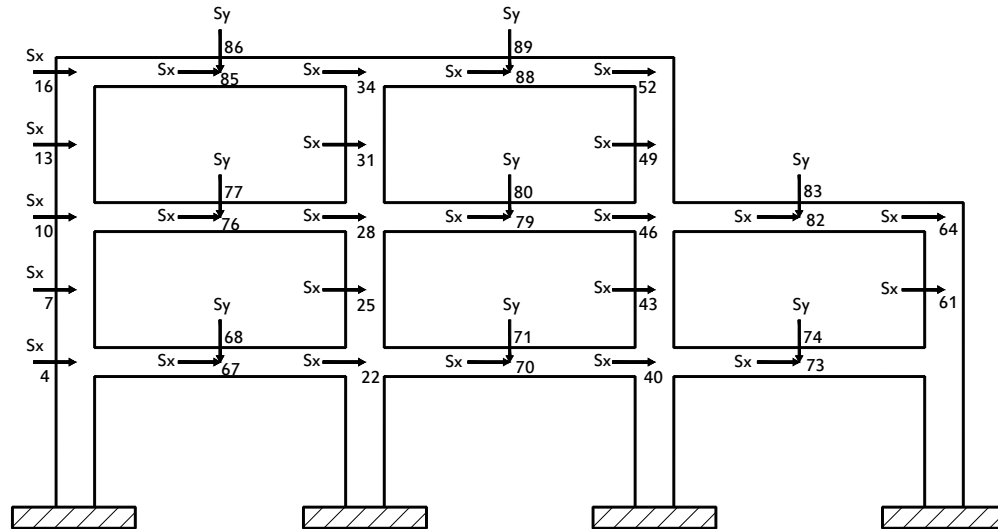


Figura 5.28 Arreglo y orientación de los sensores en el marco E2-90

^[5] Los S_x y S_y que no aparecen en el arreglo final correspondiente a E2-90, es porque aportan menos del 0.001% de la respuesta por lo menos para los cinco modos estudiados en este trabajo, excluyendo los M_0 .

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTACIÓN ÓPTIMA DEL MARCO PLANO

V. 2.5.3 Cálculo de la instrumentación para el marco E2-147

En las tablas 5.6 y 5.7, se observa la aportación que tiene cada sensor, en el monitoreo global de los primeras cinco formas modales.

Tabla 5.6 Aportaciones correspondientes a los S_x , para las primeras cinco formas modales del marco E2-147

Grado de Libertad	MODO 1	MODO 2	MODO 3	MODO 4	MODO 5	Σ_{CGL}
7	0.0030	0.0144	0.0005	0.0009	0.0001	0.0189
10	0.0074	0.0199	0.0003	0.0023	0.0001	0.0300
13	0.0144	0.0171	0.0001	0.0018	0.0002	0.0337
16	0.0232	0.0072	0.0002	0.0001	0.0000	0.0307
19	0.0333	0.0000	0.0002	0.0006	0.0003	0.0343
22	0.0446	0.0111	0.0000	0.0012	0.0002	0.0572
25	0.0559	0.0463	0.0007	0.0008	0.0002	0.1039
34	0.0031	0.0156	0.0010	0.0002	0.0000	0.0198
37	0.0074	0.0216	0.0025	0.0001	0.0000	0.0316
40	0.0145	0.0192	0.0019	0.0003	0.0000	0.0359
43	0.0232	0.0089	0.0001	0.0001	0.0000	0.0323
46	0.0333	0.0000	0.0009	0.0009	0.0000	0.0352
49	0.0448	0.0117	0.0017	0.0003	0.0000	0.0585
52	0.0556	0.0463	0.0006	0.0004	0.0000	0.1030
61	0.0031	0.0151	0.0004	0.0006	0.0001	0.0194
64	0.0073	0.0235	0.0001	0.0006	0.0003	0.0319
67	0.0143	0.0239	0.0005	0.0002	0.0003	0.0391
70	0.0227	0.0134	0.0000	0.0000	0.0000	0.0361
73	0.0323	0.0009	0.0009	0.0000	0.0001	0.0342
76	0.0436	0.0077	0.0004	0.0002	0.0001	0.0520
79	0.0555	0.0446	0.0003	0.0003	0.0004	0.1011
88	0.0030	0.0115	0.0019	0.0017	0.0001	0.0183
91	0.0073	0.0165	0.0039	0.0024	0.0000	0.0302
94	0.0139	0.0186	0.0024	0.0014	0.0000	0.0364
97	0.0221	0.0201	0.0002	0.0002	0.0000	0.0425
103	0.0031	0.0158	0.0008	0.0004	0.0000	0.0201
106	0.0031	0.0160	0.0008	0.0004	0.0000	0.0203
109	0.0031	0.0159	0.0006	0.0005	0.0001	0.0202
112	0.0030	0.0144	0.0009	0.0010	0.0001	0.0195
115	0.0030	0.0132	0.0014	0.0014	0.0001	0.0191
118	0.0233	0.0081	0.0001	0.0001	0.0000	0.0316
121	0.0233	0.0087	0.0001	0.0001	0.0000	0.0322
124	0.0231	0.0107	0.0000	0.0000	0.0000	0.0339
127	0.0229	0.0123	0.0000	0.0000	0.0000	0.0352
130	0.0226	0.0161	0.0000	0.0000	0.0000	0.0387
133	0.0224	0.0184	0.0001	0.0001	0.0000	0.0409
136	0.0560	0.0477	0.0007	0.0007	0.0001	0.1051
139	0.0559	0.0477	0.0007	0.0005	0.0000	0.1048
142	0.0557	0.0472	0.0005	0.0004	0.0001	0.1038
145	0.0557	0.0466	0.0004	0.0003	0.0002	0.1032
$\Sigma_{\text{Contribución}}$	0.96	0.77	0.03	0.02	0.00	1.7946

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTACIÓN ÓPTIMA DEL MARCO PLANO

Tabla 5.7 Aportaciones correspondientes a los S_Y , para las primeras cinco formas modales del marco E2-147

Grado de Libertad	MODO 1	MODO 2	MODO 3	MODO 4	MODO 5	Σ_{CGL}
50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0036
53	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0038	0.0038
101	0.0002	0.0004	0.0078	0.0313	0.0373	0.0770
104	0.0001	0.0002	0.0103	0.0317	0.0410	0.0834
107	0.0001	0.0001	0.0331	0.0120	0.0091	0.0545
110	0.0001	0.0008	0.0346	0.0089	0.0076	0.0519
113	0.0001	0.0006	0.0173	0.0041	0.0224	0.0446
116	0.0002	0.0001	0.0172	0.0025	0.0197	0.0396
119	0.0002	0.0008	0.0247	0.1407	0.1605	0.3268
122	0.0002	0.0011	0.0318	0.1369	0.1630	0.3329
125	0.0002	0.0013	0.0695	0.0594	0.1237	0.2541
128	0.0001	0.0005	0.0650	0.0570	0.1245	0.2471
131	0.0002	0.0109	0.1993	0.1267	0.0053	0.3423
134	0.0001	0.0060	0.2189	0.1535	0.0057	0.3842
137	0.0001	0.0029	0.0086	0.0054	0.0112	0.0283
140	0.0001	0.0014	0.0085	0.0081	0.0141	0.0322
143	0.0001	0.0007	0.0155	0.0032	0.0328	0.0524
146	0.0002	0.0049	0.0199	0.0004	0.0294	0.0548
$\Sigma_{Contribución}$	0.00	0.03	0.78	0.78	0.81	2.4134

En la figura 5.29, se muestra el arreglo y la orientación, que ocuparían los sensores para la propuesta de instrumentación analizada en el marco E2-147^[6].

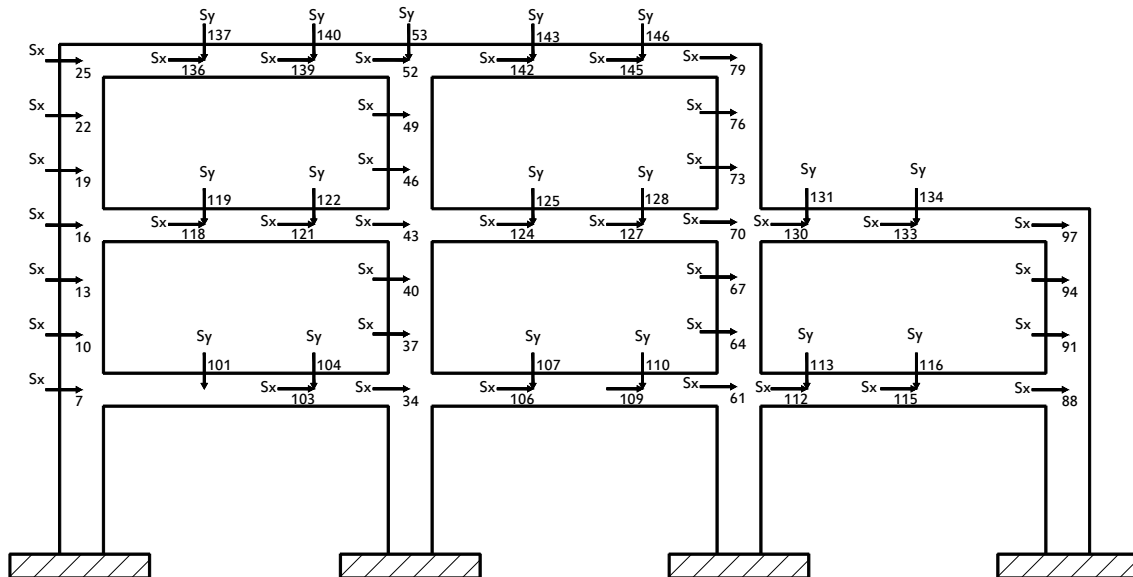


Figura 5.29 Arreglo y orientación de los sensores en el marco E2-147

^[6] Los S_X y S_Y que no aparecen en el arreglo final correspondiente a E2-147, es porque aportan menos del 0.001% de la respuesta por lo menos para los cinco modos estudiados en este trabajo, excluyendo los M_θ .

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTACIÓN ÓPTIMA DEL MARCO PLANO

V. 2.5.4 Cálculo de la instrumentación para el marco E2-204

En las tablas 5.8 y 5.9, se observa la aportación que tiene cada sensor, en el monitoreo global de los primeras cinco formas modales.

Tabla 5.8 Aportaciones correspondientes a los S_x , para las primeras cinco formas modales del marco E2-204

Grado de Libertad	MODO 1	MODO 2	MODO 3	MODO 4	MODO 5	Σ_{CGL}
1	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002
4	0.0002	0.0016	0.0001	0.0000	0.0000	0.0020
7	0.0009	0.0055	0.0003	0.0001	0.0001	0.0069
10	0.0022	0.0106	0.0003	0.0006	0.0001	0.0139
13	0.0045	0.0141	0.0002	0.0014	0.0001	0.0203
16	0.0078	0.0144	0.0001	0.0016	0.0002	0.0241
19	0.0122	0.0110	0.0001	0.0010	0.0002	0.0243
22	0.0171	0.0052	0.0001	0.0001	0.0000	0.0225
25	0.0225	0.0005	0.0002	0.0002	0.0001	0.0235
28	0.0285	0.0019	0.0000	0.0008	0.0002	0.0314
31	0.0347	0.0134	0.0000	0.0008	0.0001	0.0491
34	0.0409	0.0344	0.0005	0.0005	0.0002	0.0764
37	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002
40	0.0002	0.0018	0.0000	0.0002	0.0000	0.0023
43	0.0009	0.0061	0.0001	0.0004	0.0000	0.0075
46	0.0023	0.0115	0.0007	0.0001	0.0000	0.0146
49	0.0045	0.0153	0.0016	0.0000	0.0000	0.0213
50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0012	0.0012
52	0.0078	0.0159	0.0018	0.0002	0.0000	0.0257
55	0.0122	0.0126	0.0010	0.0002	0.0000	0.0259
58	0.0171	0.0065	0.0000	0.0000	0.0000	0.0236
61	0.0224	0.0007	0.0004	0.0006	0.0000	0.0242
64	0.0286	0.0019	0.0011	0.0006	0.0000	0.0322
67	0.0349	0.0140	0.0011	0.0001	0.0000	0.0502
70	0.0407	0.0344	0.0004	0.0002	0.0000	0.0758
76	0.0002	0.0016	0.0003	0.0000	0.0000	0.0022
79	0.0009	0.0056	0.0007	0.0002	0.0000	0.0074
82	0.0023	0.0112	0.0003	0.0004	0.0001	0.0143
85	0.0044	0.0161	0.0000	0.0005	0.0002	0.0213
88	0.0077	0.0184	0.0003	0.0003	0.0002	0.0269
91	0.0120	0.0162	0.0004	0.0001	0.0002	0.0287
94	0.0167	0.0097	0.0000	0.0000	0.0000	0.0264
97	0.0218	0.0022	0.0005	0.0000	0.0001	0.0246
100	0.0277	0.0006	0.0006	0.0001	0.0001	0.0290
103	0.0341	0.0106	0.0001	0.0002	0.0001	0.0451
106	0.0406	0.0331	0.0002	0.0002	0.0003	0.0743
112	0.0002	0.0013	0.0001	0.0002	0.0000	0.0019
115	0.0009	0.0044	0.0005	0.0007	0.0001	0.0066
118	0.0022	0.0085	0.0015	0.0012	0.0001	0.0135
121	0.0044	0.0115	0.0027	0.0016	0.0000	0.0203
124	0.0076	0.0132	0.0028	0.0015	0.0000	0.0250
127	0.0117	0.0139	0.0011	0.0005	0.0000	0.0271
130	0.0162	0.0146	0.0001	0.0002	0.0000	0.0311
133	0.0023	0.0112	0.0004	0.0005	0.0001	0.0144
136	0.0023	0.0116	0.0005	0.0004	0.0000	0.0147
139	0.0023	0.0117	0.0006	0.0002	0.0000	0.0148
142	0.0023	0.0118	0.0006	0.0002	0.0000	0.0149
145	0.0023	0.0119	0.0005	0.0003	0.0000	0.0150
148	0.0023	0.0117	0.0004	0.0004	0.0000	0.0147
151	0.0023	0.0108	0.0005	0.0006	0.0001	0.0144
154	0.0022	0.0103	0.0008	0.0009	0.0001	0.0143
157	0.0022	0.0095	0.0012	0.0010	0.0001	0.0140
160	0.0171	0.0057	0.0001	0.0001	0.0000	0.0230
163	0.0171	0.0061	0.0001	0.0001	0.0000	0.0234
166	0.0171	0.0064	0.0001	0.0000	0.0000	0.0236
169	0.0170	0.0075	0.0000	0.0000	0.0000	0.0245
172	0.0169	0.0084	0.0000	0.0000	0.0000	0.0254
175	0.0168	0.0091	0.0000	0.0000	0.0000	0.0260
178	0.0166	0.0112	0.0000	0.0000	0.0000	0.0279
181	0.0165	0.0126	0.0000	0.0000	0.0000	0.0292
184	0.0164	0.0137	0.0001	0.0001	0.0000	0.0303
187	0.0409	0.0353	0.0005	0.0004	0.0001	0.0772
190	0.0409	0.0356	0.0005	0.0004	0.0000	0.0774
193	0.0409	0.0353	0.0005	0.0003	0.0000	0.0769
196	0.0408	0.0350	0.0004	0.0002	0.0000	0.0764
199	0.0408	0.0349	0.0003	0.0002	0.0001	0.0763
202	0.0407	0.0343	0.0002	0.0002	0.0002	0.0756
$\Sigma_{Contribución}$	0.97	0.82	0.03	0.02	0.00	1.8492

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTACIÓN ÓPTIMA DEL MARCO PLANO

Tabla 5.9 Aportaciones correspondientes a los S_Y , para las primeras cinco formas modales del marco E2-204

Grado de Libertad	MODO 1	MODO 2	MODO 3	MODO 4	MODO 5	Σ_{CGL}
53	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0016	0.0016
56	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0020	0.0020
59	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0025	0.0025
62	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0027	0.0027
65	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0028	0.0028
68	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0030	0.0030
71	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0032	0.0032
134	0.0002	0.0004	0.0026	0.0118	0.0121	0.0271
137	0.0000	0.0000	0.0095	0.0362	0.0371	0.0829
140	0.0002	0.0003	0.0041	0.0124	0.0147	0.0316
143	0.0002	0.0002	0.0127	0.0048	0.0070	0.0250
146	0.0000	0.0001	0.0378	0.0116	0.0162	0.0657
149	0.0002	0.0007	0.0140	0.0027	0.0054	0.0229
152	0.0002	0.0005	0.0061	0.0029	0.0069	0.0166
155	0.0000	0.0001	0.0182	0.0058	0.0172	0.0412
158	0.0002	0.0002	0.0060	0.0015	0.0053	0.0132
161	0.0002	0.0009	0.0084	0.0535	0.0627	0.1258
164	0.0000	0.0000	0.0302	0.1546	0.1815	0.3663
167	0.0002	0.0011	0.0129	0.0511	0.0659	0.1312
170	0.0002	0.0012	0.0258	0.0275	0.0533	0.1081
173	0.0000	0.0000	0.0710	0.0780	0.1474	0.2965
176	0.0002	0.0007	0.0226	0.0266	0.0524	0.1024
179	0.0002	0.0054	0.0807	0.0452	0.0012	0.1327
182	0.0000	0.0080	0.2461	0.1524	0.0027	0.4090
185	0.0002	0.0020	0.0945	0.0618	0.0011	0.1595
188	0.0001	0.0029	0.0036	0.0021	0.0065	0.0152
$\Sigma_{Contribución}$	0.00	0.02	0.71	0.74	0.71	2.1907

En la figura 5.30, se muestra el arreglo y la orientación, que ocuparían los sensores para la propuesta de instrumentación analizada en el marco E2-204^[7].

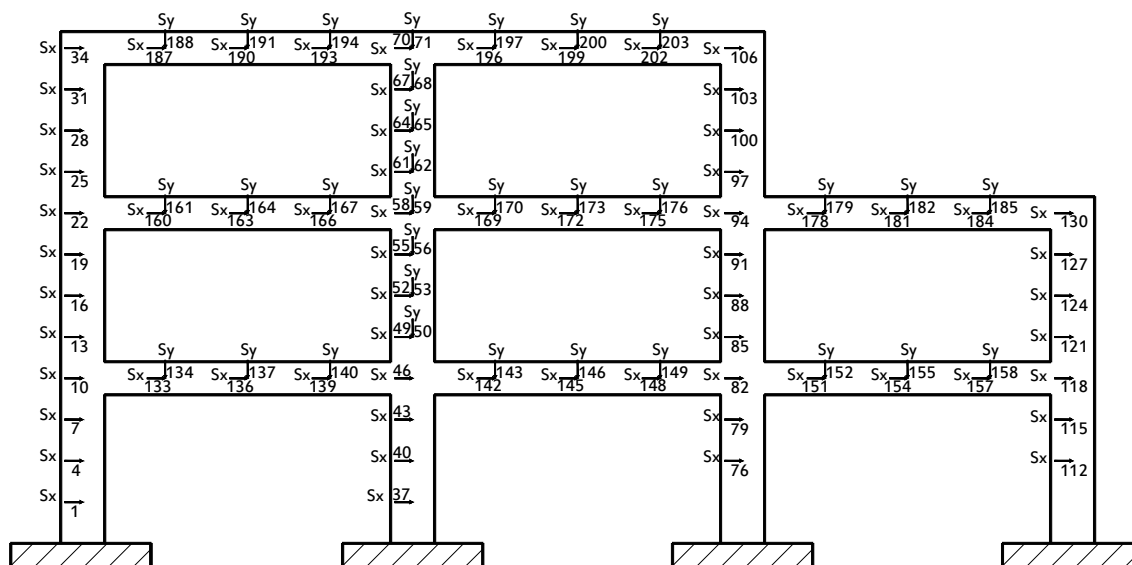


Figura 5.30 Arreglo y orientación de los sensores en el marco E2-204

^[7] Los S_X y S_Y que no aparecen en el arreglo final correspondiente a E2-204, es porque aportan menos del 0.001% de la respuesta por lo menos para los cinco modos estudiados en este trabajo, excluyendo los M_0 .

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTACIÓN ÓPTIMA DEL MARCO PLANO

V. 3 Comentarios finales

Las conclusiones que arrojaron los resultados de los marcos E2-33, E2-90, E2-147, E2-204 con respecto al óptimo número de sensores se presenta en esta sección.

La tabla 5.10 muestra la contribución de los sensores (tanto en “x” como “y”) a la aportación de la detección de las primeras cinco formas modales. El caso ideal sería obtener una sumatoria total de cinco. Se observa que el modelo E2-90 puede capturar por arriba del 93% de las formas modales. El caso menos favorable es el E2-33 donde sólo es posible obtener un 59%.

Tabla 5.10 Porcentaje de la respuesta obtenida para los primeros cinco modos correspondientes a los cuatro arreglos distintos de instrumentación

ORIENTACIÓN	E2-33	E2-90	E2-147	E2-204
S_X	2.9924	1.7957	1.7946	1.8492
S_Y	0.0000	2.8926	2.4134	2.1907
$\Sigma(S_X+S_Y)$	2.9924	4.6883	4.2080	4.0399

CINCO MODOS (%)	59.85	93.77	84.16	80.80
-----------------	--------------	--------------	--------------	--------------

En la tabla 5.11 se aprecia la cantidad total de sensores que puede colocarse en la estructura que corresponde al total de los grados de libertad con los que se modeló cada marco. Con la metodología implantada se observa que se puede reducir la cantidad de sensores hasta en un 70 % sin repercutir en la precisión requerida en el monitoreo de los primeros cinco modos fundamentales.

Tabla 5.11 Relación de sensores total & implementados en la instrumentación

MARCO	SENSORES		RELACIÓN
	TOTAL	UTILIZADOS	%
E2-33	33	10	30
E2-90	90	33	37
E2-147	147	57	39
E2-204	204	98	48

Debido a los resultados anteriores el marco E2-90 es elegido para ser estudiado y se implantará en él los distintos tipos de redes de comunicación y raíces generadoras. Esto con la finalidad de estudiar el comportamiento de distintas variables que interviene en la simulación de redes inalámbricas de sensores.

Capítulo 6

CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

En la primera parte de este capítulo se presentan las redes de comunicación y raíces generadoras implantadas al marco plano E2-90. Posteriormente se describen características, variables y parámetros fijos correspondientes a la simulación.

Además se muestra la construcción de una gráfica de información almacenada en la computadora central, con ello se pretende ilustrar los pasos a seguir durante la elaboración de cada una de las gráficas presentadas en este capítulo.

Por último son presentados los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas al marco plano E2-90.

VI. 1 Redes de comunicación

En el capítulo cuarto, fueron estudiados aspectos básicos de los algoritmos distribuidos. A continuación serán retomados con el propósito de nombrar una nomenclatura que explique los diagramas que serán utilizados durante este capítulo. Los sistemas distribuidos son modelados mediante una *red de comunicación*, ésta se idealiza mediante una gráfica $G = (V, E)$, donde el conjunto de nodos “V” representa los procesadores de la red y el conjunto de aristas “E” simboliza los canales bidireccionales de comunicación (figura 6.1).

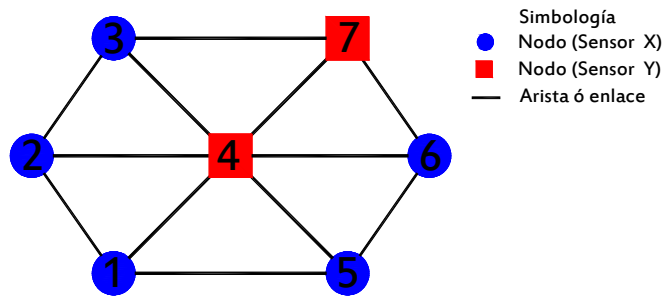


Figura 6.1 Representación esquemática correspondiente a $G = (V, E)$

VI.1.1 Redes de comunicación implantadas para el marco E2-90

A continuación se presentan los diferentes tipos de redes de comunicación propuestos para en el marco E2-90, con el propósito de monitorear el comportamiento que tiene ésta variable en la conectividad de los sensores y en el flujo de la información entre ellos, es importante mencionar que los patrones mostrados en las redes de comunicación fueron elegidos de manera aleatoria. En las figuras 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 y 6.6 se presentan los diferentes arreglos.

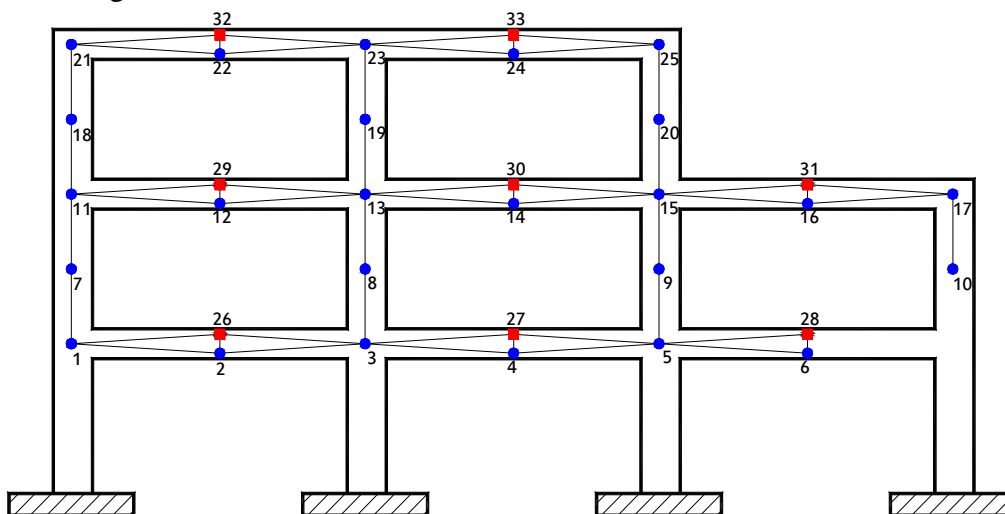


Figura 6.2 Red de comunicación I (E2-90-I)

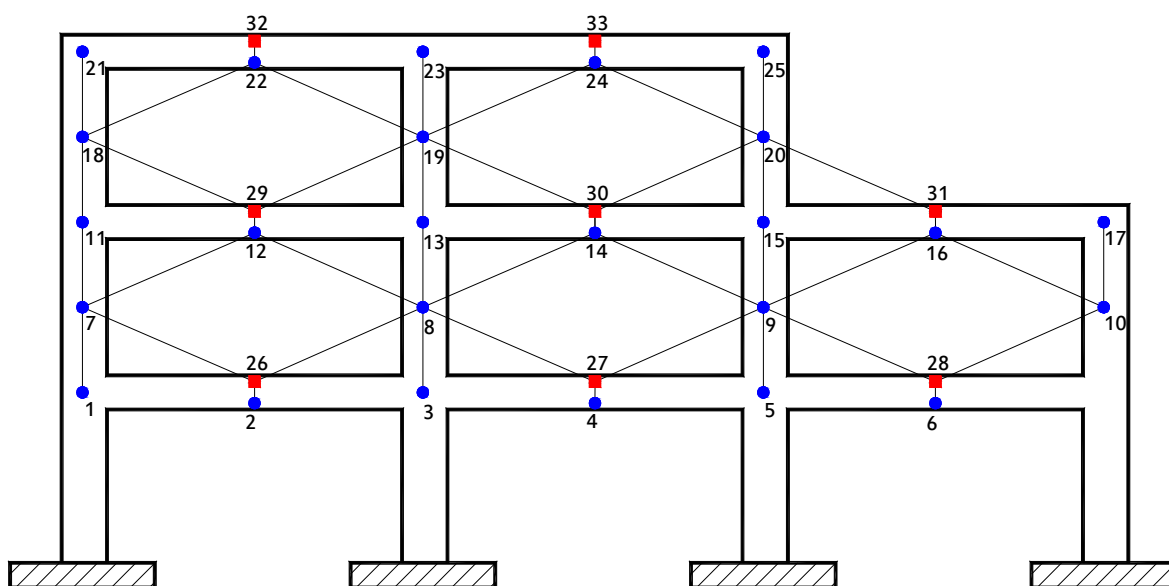


Figura 6.3 Red de comunicación II (E2-90-II)

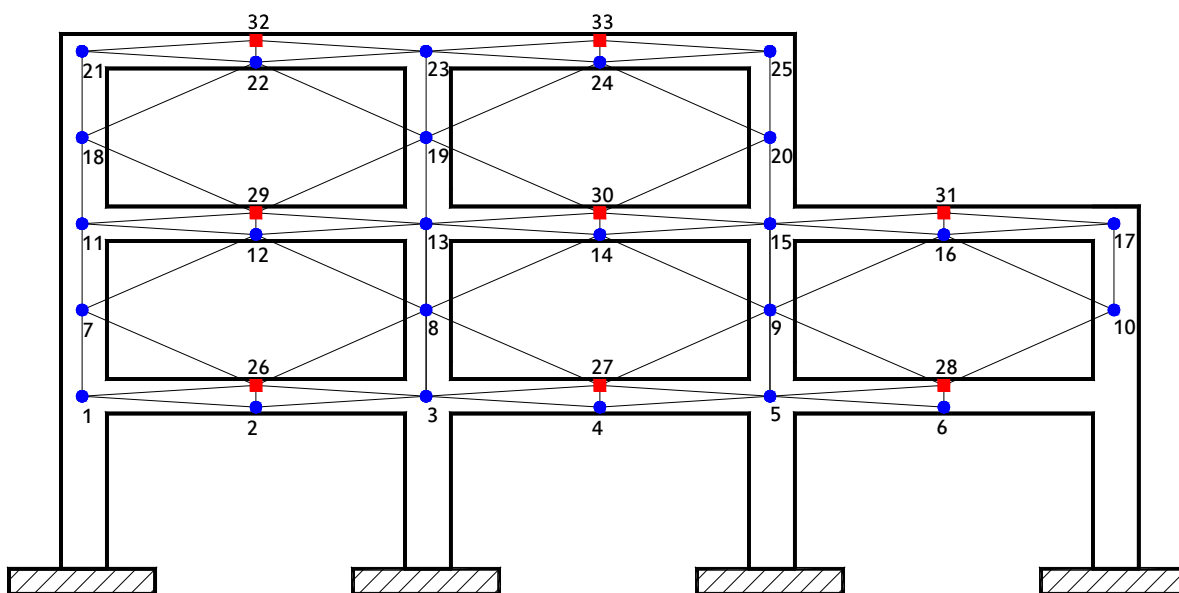


Figura 6.4 Red de comunicación III (E2-90-III)

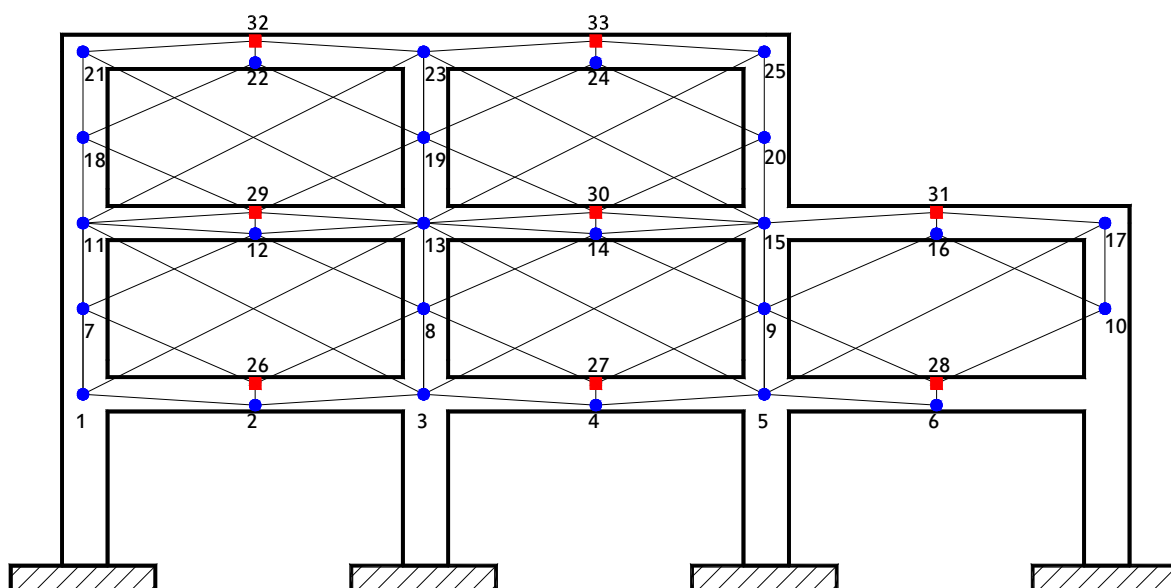


Figura 6.5 Red de comunicación IV (E2-90-IV)

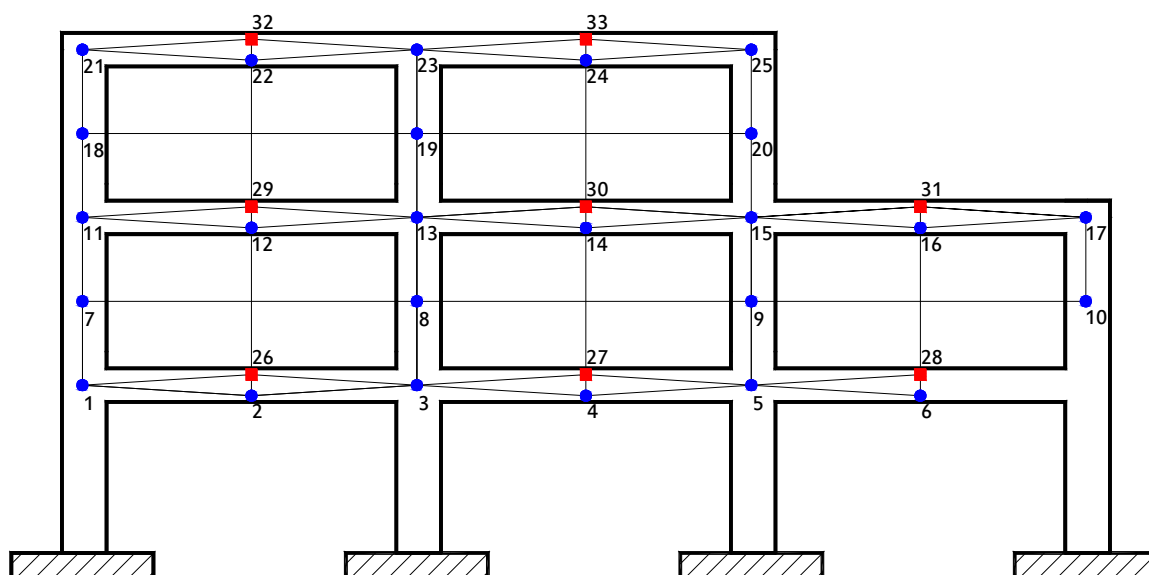


Figura 6.6 Red de comunicación V (E2-90-V)

VI.2 Raíz de árbol generador

Otra variable que es importante estudiar para conocer hasta que grado influye en el funcionamiento de la red inalámbrica de sensores, es la raíz de árbol generador. En la raíz se coloca el sensor *padre* que está conectado directamente a la computadora central. Ahí se concentra toda la información enviada por los sensores que conforman la red.

VI.2.1 Raíces propuestas para el marco E2-90

En esta sección se presentan las distintas ubicaciones propuestas para la raíz de los árboles generadores implantadas en el marco E2-90. El objetivo es estudiar el comportamiento de la red, además conocer la influencia que éstas tienen en el manejo de la información y en la conectividad los sensores, es importante mencionar que la ubicación de las distintas raíces de los árboles generadores se eligieron de manera aleatoria.

En las figuras 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11 se presentan las diferentes ubicaciones planteadas como la raíz del árbol generador. Se muestran mediante el esquema de una computadora unida a un nodo.

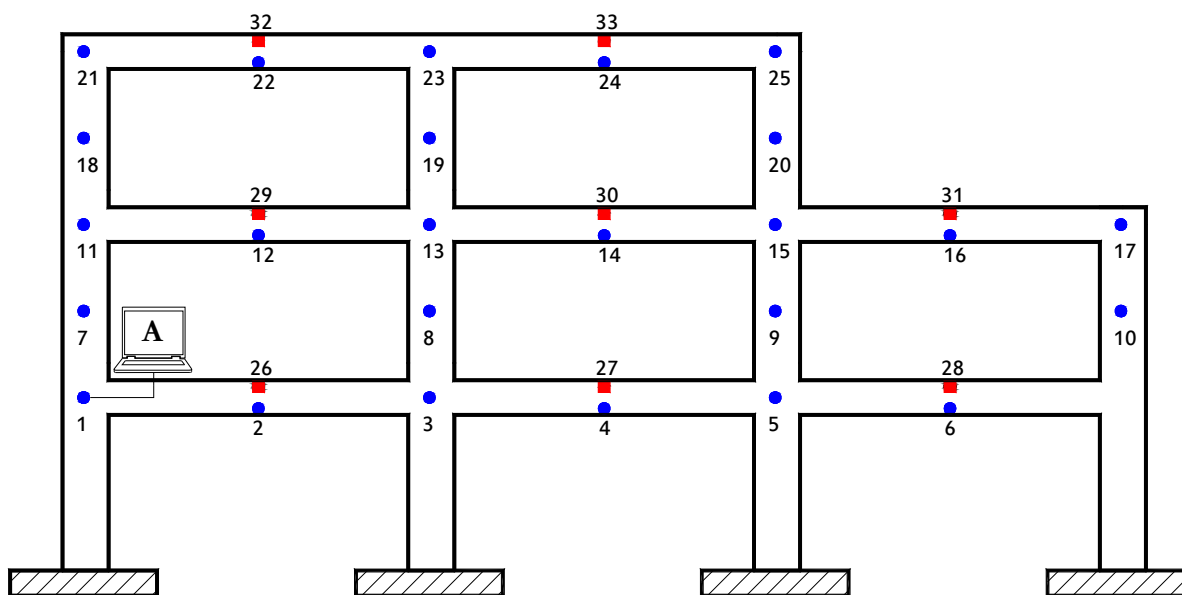


Figura 6.7 Ubicación A de la raíz del árbol generador (E2-90-A)

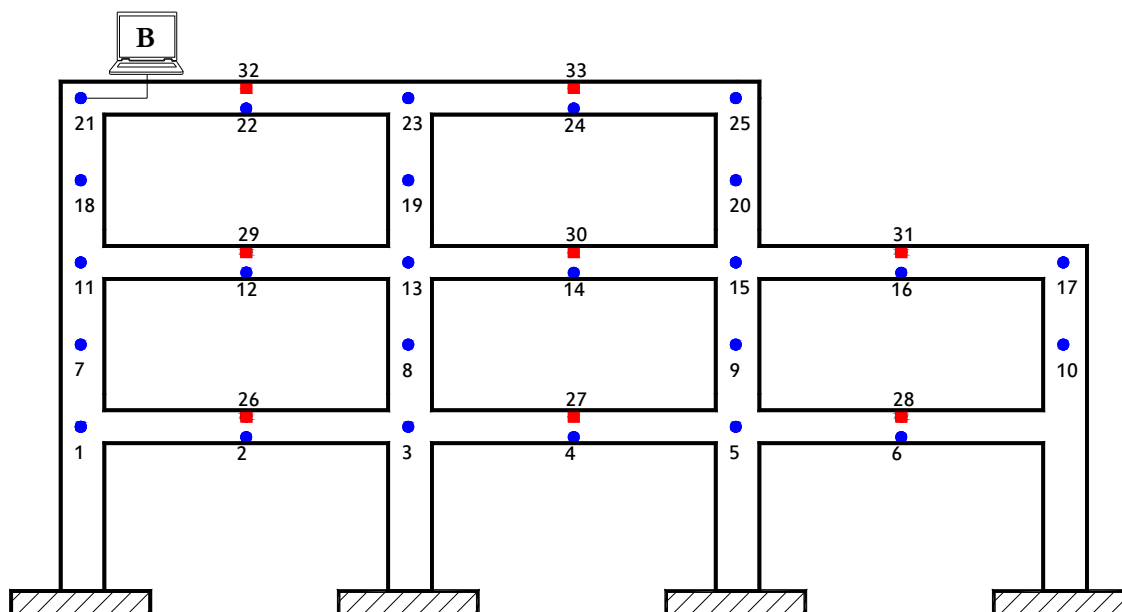


Figura 6.8 Ubicación B de la raíz de árbol generador (E2-90-B)

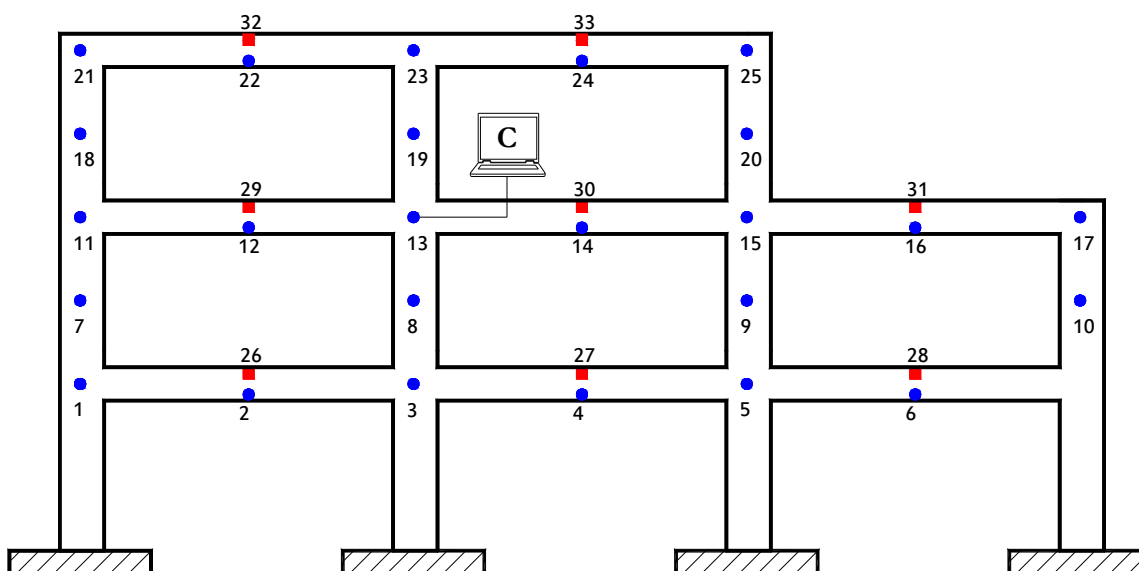


Figura 6.9 Ubicación C de la raíz de árbol generador (E2-90-C)

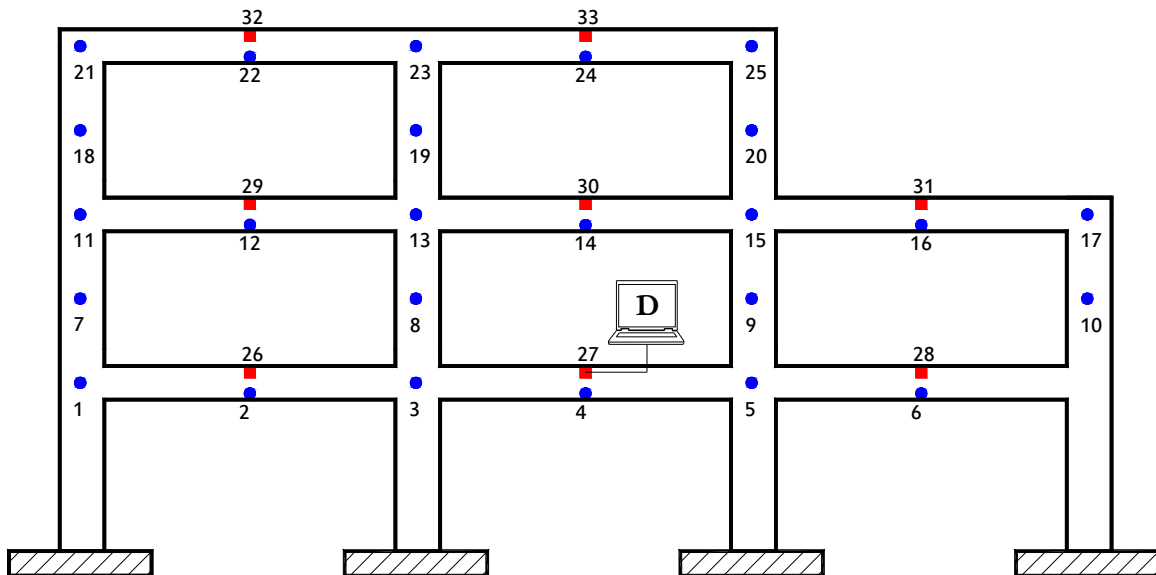


Figura 6.10 Ubicación D de la raíz de árbol generador (E2-90-D)

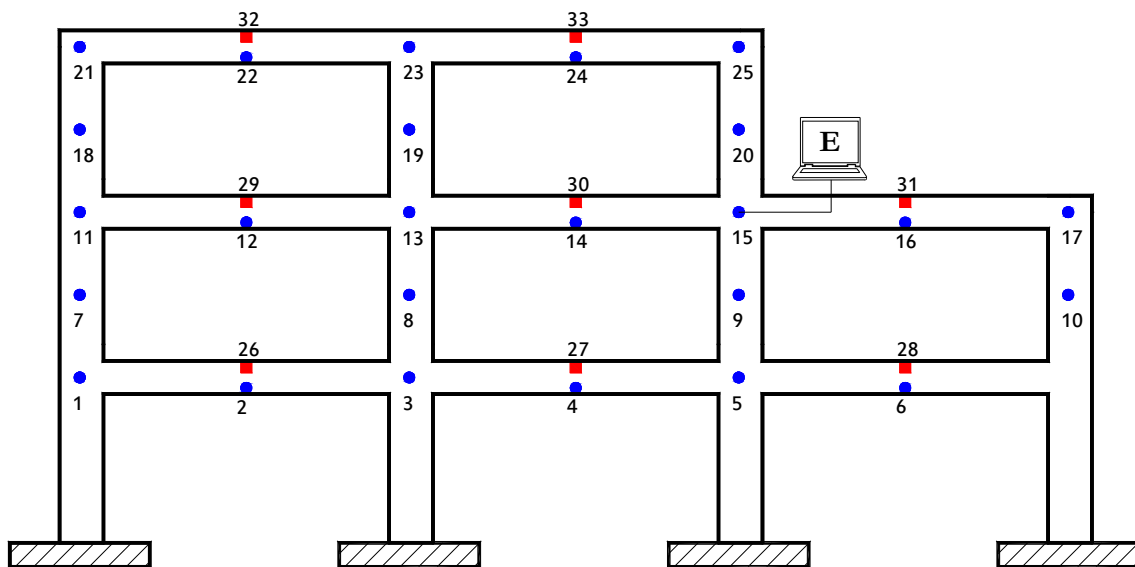


Figura 6.11 Ubicación E de la raíz de árbol generador (E2-90-E)

VI.3 Simulación de la red inalámbrica distribuida

Se utilizó un simulador implantado en el lenguaje C++, que fue desarrollado por Marcelín (2000). Este simulador permite modificar las siguientes variables: red de comunicación, raíz de árbol generador, periodo de barrido, tamaño del buffer; velocidad del canal y bits generados por el sensor.

En nuestro modelo simplificado todos los nodos tienen el mismo rango de transmisión igual a uno. La gráfica G se denomina de distancia unitaria, existe un enlace entre dos nodos cuya distancia menor o igual a uno. Las suposiciones realizadas son: i) dado el protocolo de acceso al medio (MAC) esté en operación en la red subyacente, ii) todos los nodos conocen su localización geográfica, iii) cada nodo conoce a sus vecinos inmediatos, iv) se asume que todos los nodos excepto uno, tiene un vecino al poniente. Algunos nodos pueden sufrir colapsos y pueden ser considerados fuera de servicio permanentemente.

VI.3.1 Protocolo de sincronía, transporte y agregación (PSTA)

Según Marcelín (2006), podemos conceptualizar la solución como dos tareas a cargo de dos capas adyacentes que se superponen. La primera proporciona la *sincronía* y la segunda proporciona la *agregación y el transporte*. El protocolo relacionado con la sincronía corre a cargo del algoritmo DFS, mientras que el protocolo de agregación y transporte corre a cargo del algoritmo PI. Naturalmente la capa de sincronía se inicializa y pone en operación primero y posteriormente construye la capa de transporte. Sobre la misma gráfica construimos un árbol DFS y un árbol PI.

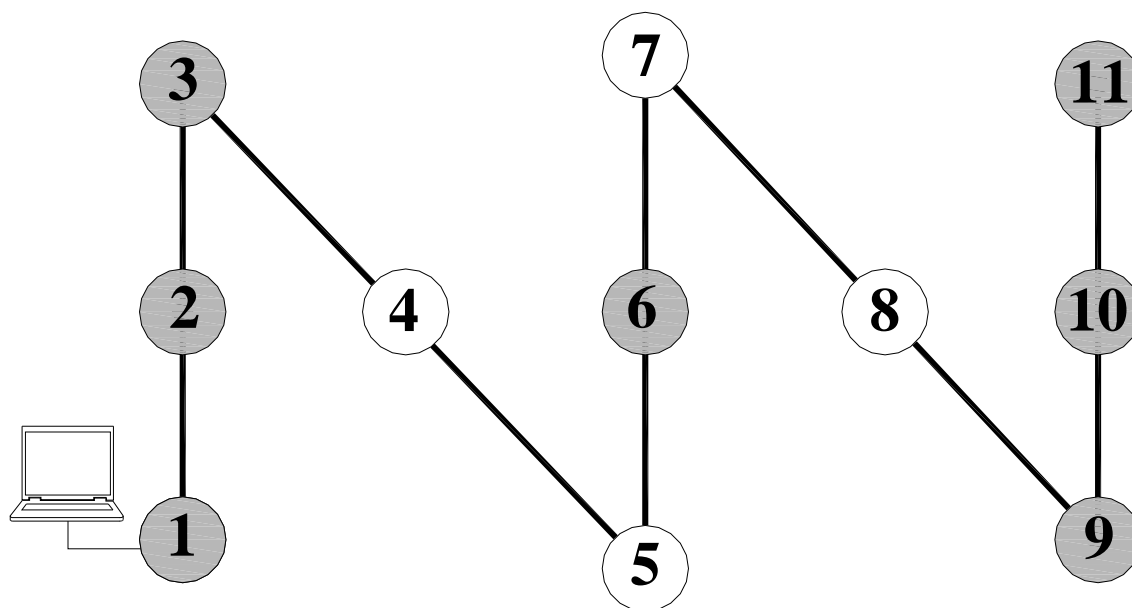
La ficha DFS recorre serialmente la gráfica y habilita al nodo que lo recibe para efectuar su tarea de transporte. Cuando una entidad de transporte es *sincronizada* recibe el pulso de DFS que le autoriza para efectuar una acción de transporte. Una vez termina la acción de transporte notifica a su entidad de sincronía subyacente para que, a su vez, reexpida el pulso y sincronice el siguiente nodo.

El PSTA se divide en tres fases:

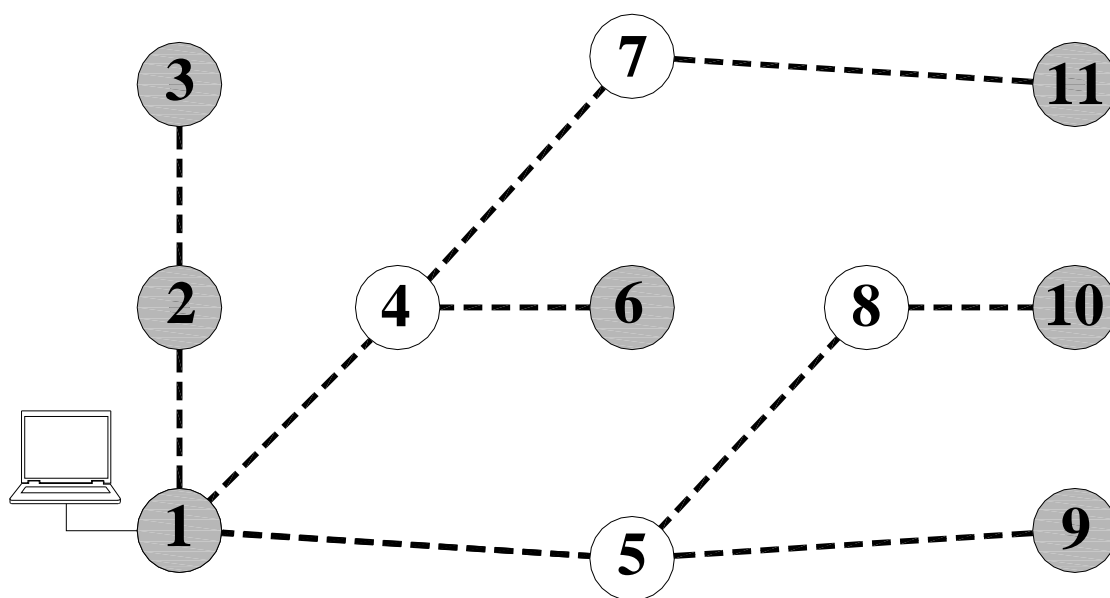
1^{ra} Se construye el recorrido DFS a partir de punto recolector *s* (figura 6.12a).

2^{da} Se construye un árbol PI, donde los nodos transmiten sus mensajes solamente cuando se les sincroniza. Al terminar su fase de inicialización, el protocolo de sincronización genera recorridos, el pulso trabaja como sincronizador a partir del momento que comienza su recorrido de regreso, esto es, cuando visita al último nodo del árbol DFS, (figura 6.12b).

3^{ra} El nodo transmite sus *datos agregados* sobre la *estructura de transporte*, cada vez que recibe un pulso de sincronía (figura 6.13).



a) Árbol DFS para sincronía



b) Árbol PI para transporte y agregación

Figura 6.12 Árboles generadores construidos en la simulación

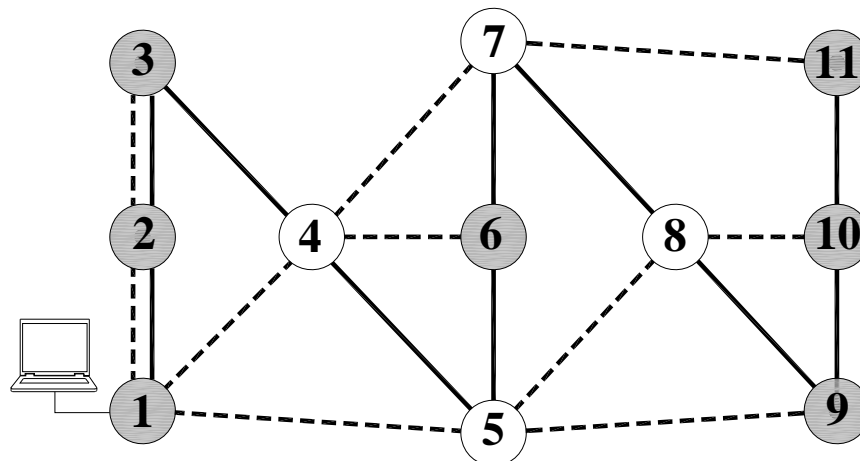


Figura 6.13 Superposición de capas (DFS-PI)

Al iniciar la simulación en el instante $t_i = 0$, el nodo padre se auto envía un mensaje “**DESCUBRE**”, con ello inicia la construcción del primer árbol generador mediante la metodología DFS (capa de sincronía). El árbol estará construido cuando el nodo padre recibe de su nodo hijo el mensaje “**REGRESA**”, esto ocurre en el instante $t_{ii} = 2N - 2$, donde N es el número de sensores.

En el instante $t_{iii} = 2N-1$, el nodo padre se auto envía un mensaje “**RECORRIDO**”, con ello comienza la construcción del árbol generador con la metodología PI (capa de transporte y agregación), el cual es concluido cuando el nodo padre recibe un mensaje “**RECORRIDO**” de si mismo, esto ocurre en $t_{iv} = 4N - 3$.

En la simulación intervienen diferentes variables. Con el objeto de estudiar el comportamiento de cada una de ellas durante el proceso de recolección y transmisión de información, se elaboraron distintas combinaciones.

VI.3.2 Variables y parámetros fijos en la simulación

Se consideraron como variables en la simulación, todas aquellas que puedan ser modelados de maneras diferentes. A continuación se presentan las distintas variables que participan en cada una de las simulaciones realizadas.

Red de comunicación. Ésta se relaciona con la conectividad que tiene cada sensor a la red que pertenece, por tal motivo existen un número muy grande de combinaciones. En este trabajo fueron abordadas cinco posibles combinaciones (I a V), con el propósito de conocer hasta qué grado afecta dicha variable en la simulación.

Raíz de árbol generador. Es el origen, en ella comienza y termina la simulación. En este punto se envía toda la información a la computadora central. Se proponen cinco posibles raíces del árbol (A a E).

CAPÍTULO 6. CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

Periodo de Barrido. Esta variable también se conoce con el nombre tiempo de refresco, se relaciona con el lapso de tiempo necesario para almacenar la información censada por los instrumentos de medición en la computadora central sin que se desborde el buffer, es decir, sin que se pierda información.

Los parámetros fijos son definidos como aquéllos que sólo dependan de las características técnicas de los instrumentos de medición.

Tamaño del buffer. Es una característica importante de los dispositivos de medición. Ésta se refiere a la cantidad de información que pueden almacenar dicho dispositivo. Para este trabajo se consideró que los dispositivos de medición tienen un buffer de 4096000 bits.

Velocidad del canal. Este parámetro indica la velocidad con que puede ser transmitida una cantidad limitada de información por segundo por lo tanto es una característica técnica del sensor. En este trabajo dicha cantidad es 38400 bits/seg.

Bits generados por el sensor. Ésta característica del sensor indica la cantidad de bits que es generado por un sensor durante en un segundo, en esté estudio dicha cantidad es igual a 200 bits/seg.

VI.3.3 Nomenclatura utilizada en la simulación

En la tabla 6.1 se muestra la nomenclatura utilizada en las combinaciones resultantes de mezclar las redes de comunicación (I, II, III, IV y V) con las raíces del árbol generador (A, B, C, D y E), además esos resultados deben de ser combinados con distintas frecuencias de barrido (10, 50, 100, 130, 200 y 400 segundos), En la siguiente sección se presentarán los resultados obtenidos de todas las combinaciones.

Tabla 6.1 Combinaciones resultantes de mezclar la red de comunicación y la raíz del árbol generador

RED/RAÍZ	A	B	C	D	E
I	xx	xx	xx	xx	**
II	xx	xx	xx	**	xx
III	xx	xx	xx	xx	xx
IV	xx	xx	xx	xx	xx
V	xx	xx	xx	xx	xx

^{xx}Dichas combinaciones no presentaron irregularidades durante el proceso de simulación, es decir, los parámetros medidos no reportan resultados erráticos.

^{**}Estás combinaciones ocasionaron problemas de inestabilidad del software durante la simulación, así como resultados erráticos.

CAPÍTULO 6. CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

Tabla 6.2 Nomenclatura utilizada en las simulaciones

RED/RAÍZ	A	B	C	D	E
I	E2-90-IA	E2-90-IB	E2-90-IC	E2-90-ID	**
II	E2-90-IIA	E2-90-IIB	E2-90-IIC	**	E2-90-IIIE
III	E2-90-IIIA	E2-90-IIIB	E2-90-IIIC	E2-90-IIID	E2-90-IIIE
IV	E2-90-IVA	E2-90-IVB	E2-90-IVC	E2-90-IVD	E2-90-IVE
V	E2-90-VA	E2-90-VB	E2-90-VC	E2-90-VD	E2-90-VE

donde:

E2	Representa a la estructura.
90	Grados de libertad de la estructura.
I, II, III, IV y V	Redes de comunicación.
A, B, C, D y E	Raíces del árbol generador.

A continuación se presenta de forma detallada la construcción de una gráfica de información almacenada, así como comportamientos particulares que se presentaron en distintas simulaciones.

Posteriormente se presentan los resultados obtenidos en las muestras denotadas mediante el símbolo “XX”, las cuales representan el 92 % de la muestra total.

VI.4 Simulación

Una vez que se conoce la instrumentación del sistema estructural (E2-90), son implantados cinco arreglos de redes de comunicación (I, II, III, IV y V), las cuales representan los canales bidireccionales de la red y cinco raíces generadoras (A, B, C, D y E) las cuales representan la conexión de la red a la computadora que recolecta la información monitoreada por todos los sensores, además en la simulación interviene otra variable conocida como periodo de barrido (10, 50, 100, 130, 200 y 400 segundos), la cual indica a los sensores el intervalo de tiempo en el que debe ser enviada la información al sensor padre de cada uno de los sensores.

En las simulaciones existen tres parámetros conocidos, estos dependen directamente de las características técnicas de los instrumentos de medición, y son conocidos como tamaño del buffer, velocidad del canal y bits generados por el sensor, los cuales tienen los siguientes valores 4,096,000 bits, 38,400 bits/seg y 200 bits/seg, respectivamente.

Los resultados de las simulaciones se obtienen como se muestra en la figura 6.14, en donde al iniciar la simulación, el nodo raíz se auto envía un mensaje de “DESCUBRE”, (1@0 DESCUBRE from 1), con ello inicia la construcción del árbol generador mediante la

CAPÍTULO 6. CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

metodología DFS, este concluirá cuando el nodo padre recibe de sus nodos hijos el mensaje “REGRESA”, (1@64 REGRESA from 2).

Al concluir la construcción del primer árbol (capa de sincronía), el nodo padre se auto envía un mensaje “RECORRIDO”, (1@65 RECORRIDO from 1) con ello inicia la construcción del segundo árbol generador mediante la metodología PI (capa de transporte y agregación), que finalizara cuando el nodo padre recibe un mensaje “RECORRIDO” de si mismo (1@130 RECORRIDO from 1).

```
experimento inicializado
1@0 DESCUBRE from 1
2@1 AVISO from 1
7@1 AVISO from 1
26@1 AVISO from 1
2@1 DESCUBRE from 1
3@2 AVISO from 2
26@2 AVISO from 2
3@2 DESCUBRE from 2
.
.
.
3@62 REGRESA from 4
2@63 REGRESA from 3
1@64 REGRESA from 2
1@65 RECORRIDO from 1
2@66 PI from 1
7@66 PI from 1
26@66 PI from 1
2@66 RECORRIDO from 1
3@67 PI from 2
3@67 RECORRIDO from 2
.
.
.
1@130 RECORRIDO from 1
1@130 los datos de mis hijos son :0
1@130 los datos a enviar son :0
1@131 DATOS from 1 son :0
1@131 total de DATOS de los hijos :0
2@131 RECORRIDO from 1
.
.
.
31@19761.3 los datos de mis hijos son :0
31@19761.3 los datos a enviar son :80000
31 aqui se detiene la ficha
16@19761.3 DATOS from 31 son :80000
16@19761.3 total de DATOS de los hijos :960000
1@19796.7 DATOS from 1 son :2559995
1@19796.7 total de DATOS de los hijos :2639995
2@19796.7 RECORRIDO from 1
```

Figura 6.14 Simulación E2-90-VA

CAPÍTULO 6. CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

Una vez contruidos los árboles generadores estos trabajaran como dos capas adyacentes que se superponen, donde el protocolo relacionado con la sincronía corre a cargo del algoritmo DFS, mientras que el protocolo de agregación y transporte, corre a cargo del algoritmo PI.

La ficha DFS recorre serialmente la gráfica y habilita al nodo que lo recibe para efectuar su tarea de trasporte. Cuando una entidad de transporte es *sincronizada* recibe el pulso de DFS que le autoriza para efectuar una acción de transporte. En cuanto termina la acción de transporte notifica a su entidad de sincronía subyacente para que, a su vez, reexpida el pulso y sincronice el siguiente nodo (2@19796.7 RECORRIDO from 1).

VI.5 Construcción de las gráficas de información almacenada

Una vez que se tiene los resultados de cada una de las simulaciones, estos se agrupan con el propósito de encontrar tendencias que represente el comportamiento generalizado de las 150 simulaciones. Por ello se elige como punto de partida la información almacenada en la raíz del árbol generador, en la figura 6.15 son mostrados los resultados filtrados para la simulación E2-90-VA, $t = 10$ seg., y en la figura 6.16 se muestra la gráfica de información almacenada construida a partir de esos datos.

```
1@140.052 DATOS from 1 son :2000
1@150.103 DATOS from 1 son :3950
1@160.207 DATOS from 1 son :7938
1@170.372 DATOS from 1 son :14303
1@180.612 DATOS from 1 son :23486
1@190.858 DATOS from 1 son :32966
1@201.068 DATOS from 1 son :41002
.
.
.
1@361.661 DATOS from 1 son :63789
1@371.659 DATOS from 1 son :63717
1@381.658 DATOS from 1 son :63681
1@391.659 DATOS from 1 son :63723
1@401.661 DATOS from 1 son :63799
1@411.663 DATOS from 1 son :63869
1@421.665 DATOS from 1 son :63923
.
.
.
1@19911.7 DATOS from 1 son :64000
1@19921.7 DATOS from 1 son :64000
1@19931.7 DATOS from 1 son :64000
1@19941.7 DATOS from 1 son :64000
1@19951.7 DATOS from 1 son :64000
1@19961.7 DATOS from 1 son :64000
1@19971.7 DATOS from 1 son :64000
```

Figura 6.15 Información almacenada en la computadora central durante la simulación E2-90-VA $t = 10$ seg.

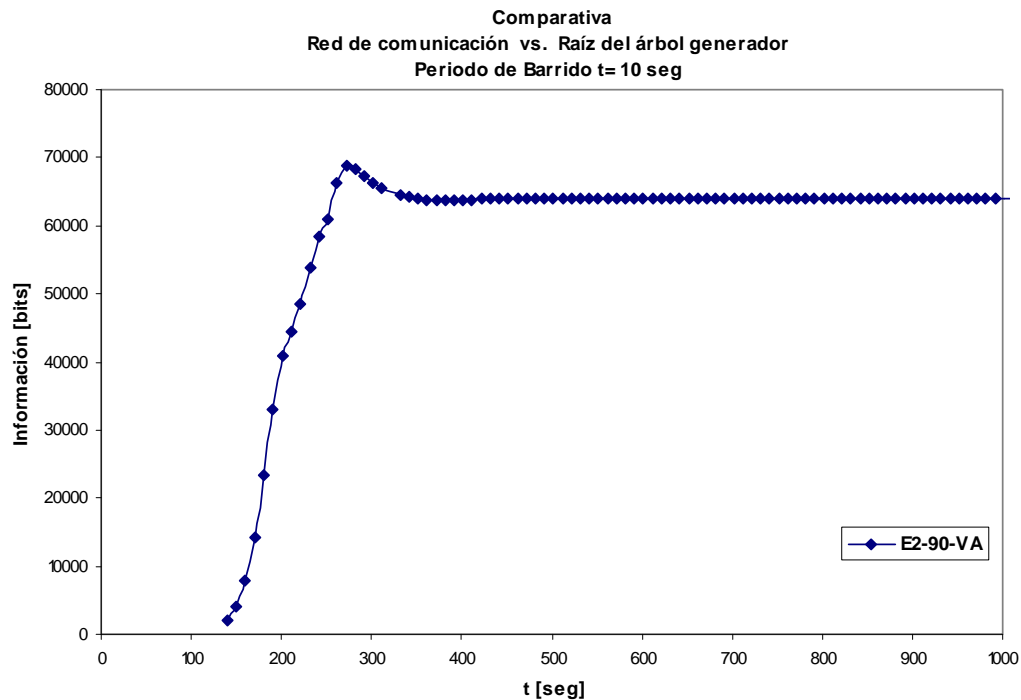


Figura 6.16 Gráfica de la información almacenada durante la simulación E2-90-VA $t = 10$ seg.

VI.6 Comportamientos particulares en las gráficas de información almacenada

En algunas simulaciones se observan dos clases de comportamiento particular que difieren sustancialmente de las otras tendencias agrupadas en las en la misma gráfica de información almacenada, dichas conductas son nombradas como comportamiento oscilatorio y comportamiento escalonado, a continuación se presenta una explicación de lo que representa cada una de ellas.

VI.6.1 Comportamiento oscilatorio

En la figura 6.17, se observa que en la gráfica E2-90-ID se presenta un comportamiento oscilatorio, el cual es ocasionado por una serie de puntos que logran evadir el filtro aplicado al conjunto de información, siendo el valor real el ubicado en la cresta.

Lo antes mencionado aplica para las siguientes graficas E2-90-ID (periodos de barridos de 10, 50, 100, 130, 200 y 400), E2-90-IIIB (periodos de barridos de 10, 50, 100, 130, 200 y 400) y E2-90-VB (periodos de barridos de 10, 50, 100, 130, 200 y 400).

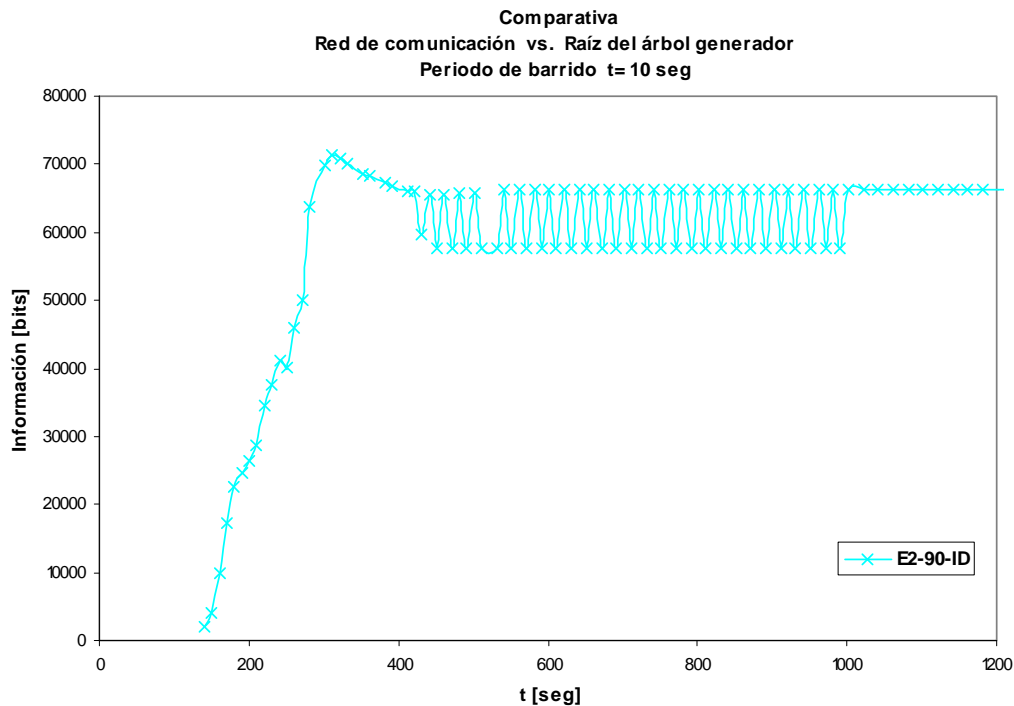


Figura 6.17 Gráfico de la información almacenada durante la simulación E2-90-ID $t = 10$ seg.

VI.6.2 Comportamiento escalonado

Se denomina comportamiento escalonado cuando en una o más gráficas de información almacenada en la computadora central (para una misma red de comunicación), se presenta un decaimiento en el eje de las ordenadas en cualquiera de las gráficas.

El decaimiento se relaciona con la cantidad de información almacenada y este a su vez representa la influencia de la raíz generadora en el proceso de simulación. En la figura 6.18 se observa el decaimiento en la gráfica E2-90-ID, esto quiere decir que dicha combinación es la óptima del conjunto de combinaciones mostradas y representadas por cada una de las gráficas, con ello se garantiza que el sistema E2-90-ID, se estabiliza con mayor rapidez.

Si logramos que el sistema se estabilice con mayor rapidez podemos evitar pérdida de información ocasionada por el desborde del buffer, además se garantiza la escalabilidad de la red.

Con los resultados obtenidos se puede afirmar que la ubicación de la raíz generadora, es una variable importante ya que una correcta localización de la misma puede contribuir en un proceso más eficiente de la recolección de información. Pero ya que en las redes de

CAPÍTULO 6. CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

comunicación existe un número considerable de posibles ubicaciones de dicha variable el proceso de selección resulta azaroso.

Además, se puede afirmar que la conectividad de los sensores por lo menos para las distintas combinaciones estudiadas en este trabajo, no representan una variación considerable en los resultados obtenidos, esto puede deberse a que las distintas redes de comunicación simuladas en este trabajo no son integradas por un número grande de nodos.

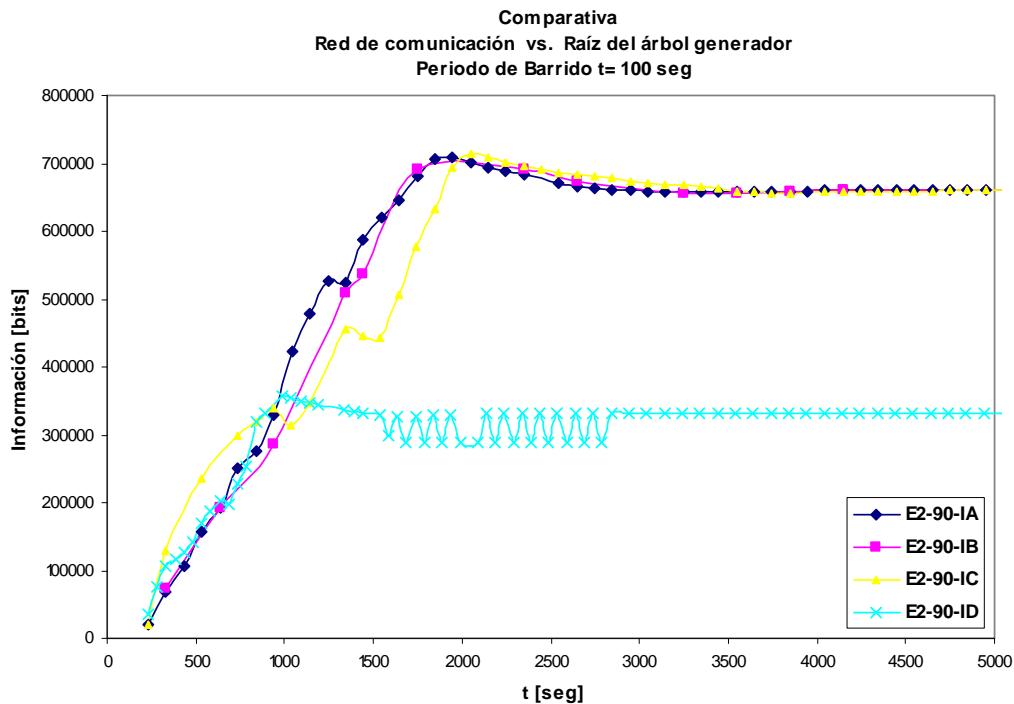


Figura 6.18 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 100$ seg.

VI. 7 Resultados obtenidos

En cada una de las simulaciones se observa que el proceso de formación de la capa de sincronía (árbol DFS) y la capa de agregación y transporte (árbol PI), son completadas adecuadamente en un $t = 4N - 3$, lo cual se comprueba en la figura 6.19. Por lo que satisface los requerimientos con los que se concibo, es decir, la realización de dos tareas a cargo de dos capas adyacentes (figura 6.13), que se superponen con la finalidad de construir una red de sensores inalámbrica. Esta red cumple entonces con los siguientes atributos: escalable, autoconfigurable y tolerante a fallas.

CAPÍTULO 6. CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

De las gráficas de información almacenada en la computadora central para las distintas redes, raíces y periodos de barrido se puede concluir que la construcción de los árboles generadores ocurre en los siguientes momentos (tabla 6.3).

Tabla 6.3 Secuencia de construcción de los árboles DFS y PI

Inicio la construcción del árbol DFS	Termina la construcción del árbol DFS	Inicio la construcción del árbol PI	Termina la construcción del árbol PI
t_i	$t_{ii} = 2N-2$	$t_{iii} = 2N_S-1$	$t_{iv} = 4N-3$

Los tiempos de inicialización así como de terminación en todas las combinaciones simuladas, se presentan en la tabla 6.4

Tabla 6.4 Tiempos de inicialización y terminación de árboles DFS y PI en las simulaciones

$N_S = 33$ sensores			
t_i	t_{ii}	t_{iii}	$t_{iv} = f_b$
[segundos]	[segundos]	[segundos]	[segundos]
0	64	65	129**

** Cuando $t_{iv} = 129$ segundos se concluye la construcción de las dos capas, a partir de ese momento los nodos transmiten los datos *agregados* sobre la *estructura de transporte*, cada vez que recibe un pulso de sincronía como se puede apreciar en la figura 6.19.

Además de las simulaciones se establecer la siguiente ecuación que describe el comportamiento del proceso de agregación de datos sobre la estructura.

$$I = N_S R P_b \quad (6.1)$$

donde:

- I = tamaño del buffer (4,096,000 bits).
- N = cantidad de sensores colocados en la estructura (33 sensores).
- R = bits generados por el sensor (200 bits/seg.).
- P_b = periodo de barrido (seg.).

La ecuación 6.1 establece el comportamiento que tendrá el flujo de información a través de la red inalámbrica de sensores. Esto nos ayuda a predecir los siguientes problemas, saturación del buffer, periodo de barrido, colapso del sistema, pérdida de la información y cuellos de botella.

De la ecuación 6.1 podemos obtener el periodo de barrido máxima con la finalidad de no sobrepasar las capacidades del buffer.

$$P_{MAX} = \frac{I}{N_s R} \quad (6.1.1)$$

donde:

P_{MAX} = periodo máxima de barrido para evitar el desborde del buffer.

En el caso particular de las simulaciones realizadas en este proyecto la frecuencia máxima de barrido es 620 segundos.

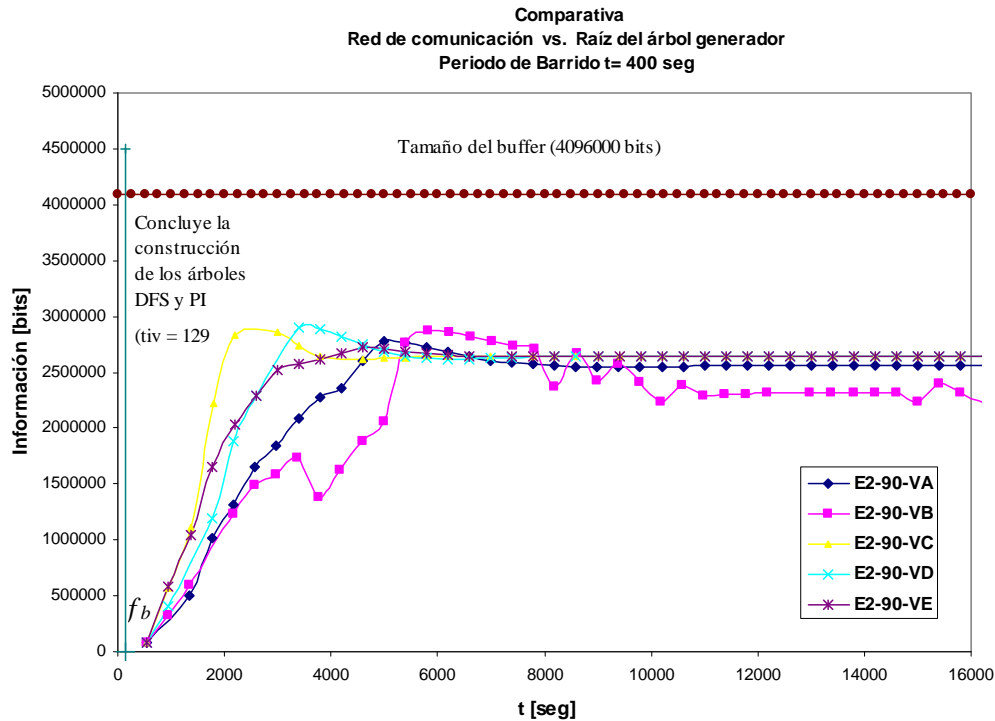
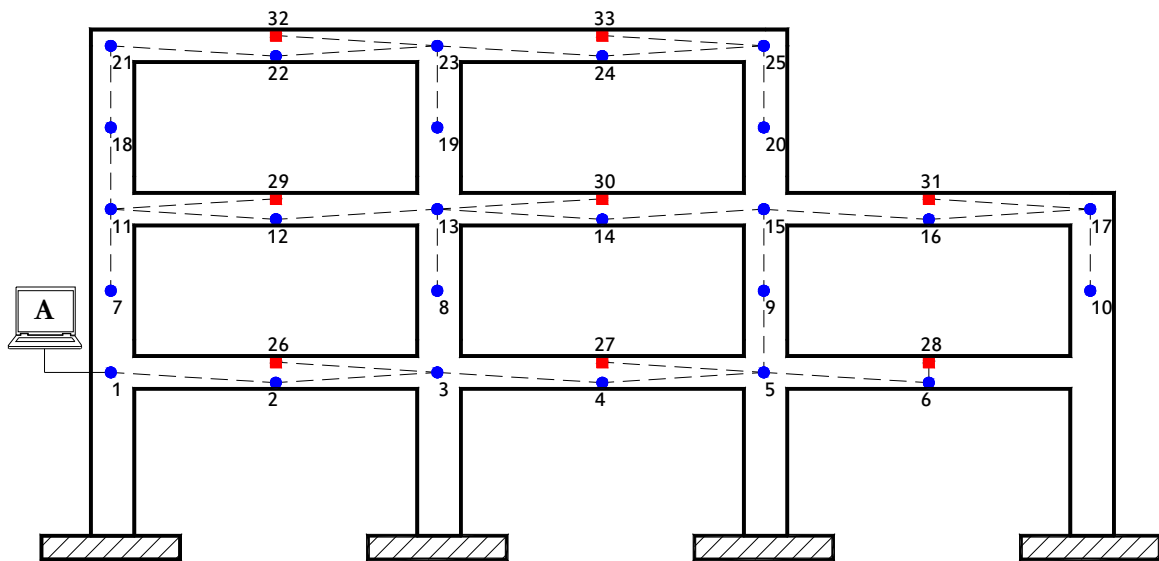


Figura 6.19 Gráfica genérica de información almacenada en la computadora central durante la simulación 400 seg.

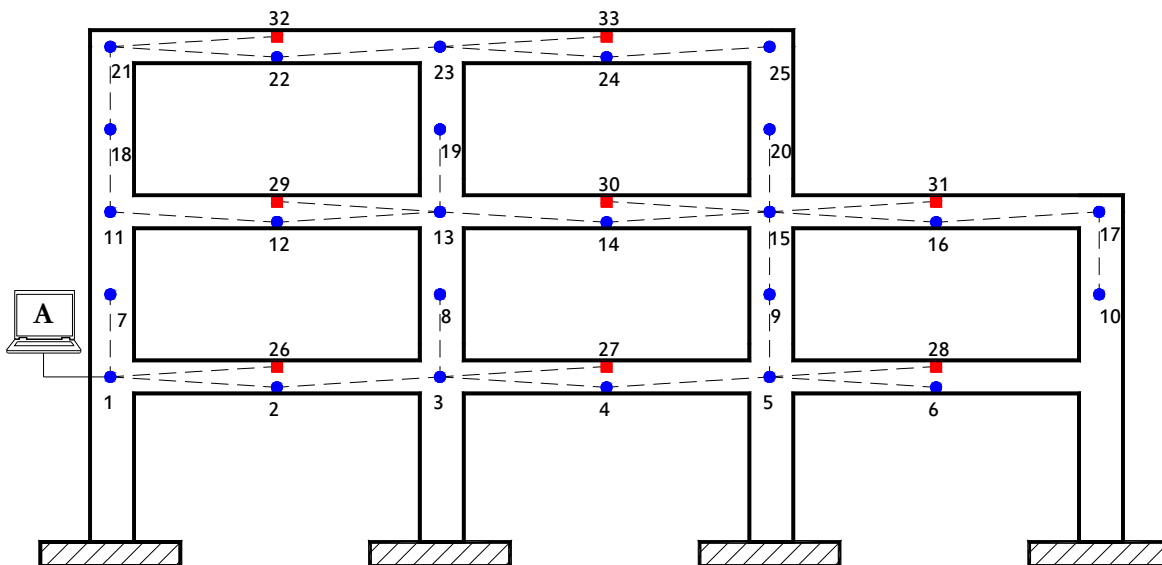
VI.8 Árboles generadores y gráficas de información almacenada

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en las distintas simulaciones realizadas a las combinaciones mostradas en la tabla 6.1, para frecuencias de barrido 10, 50, 100, 130, 200 y 400 segundos. Además se muestran los árboles generadores construidos durante la simulación.

VI.8.1 E2-90-IA, E2-90-IB, E2-90-IC y E2-90-ID

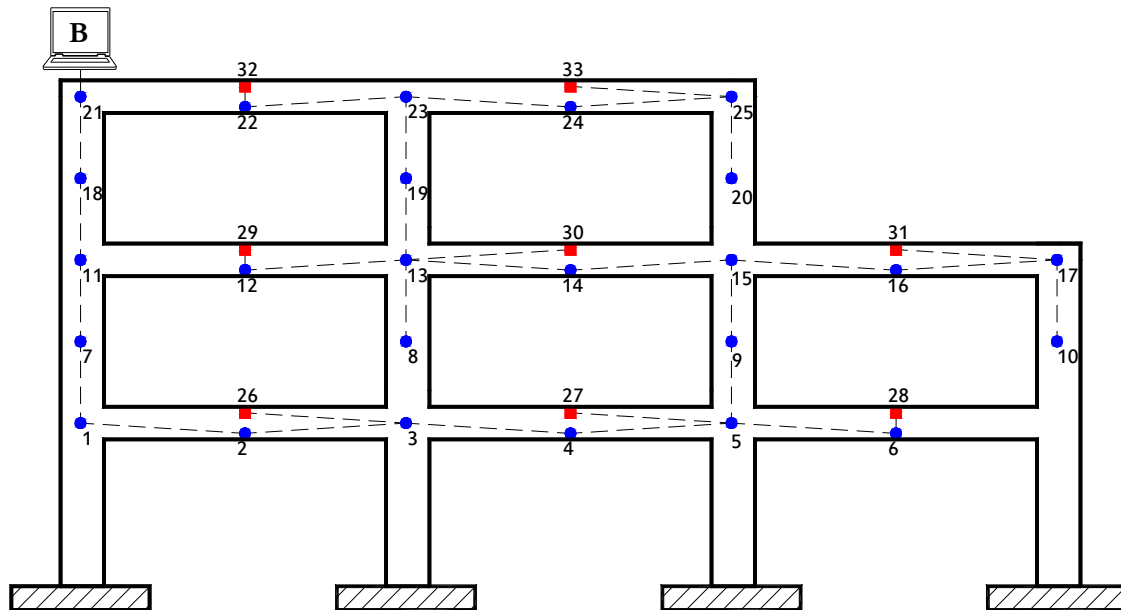


a) Búsqueda en profundidad “DFS”



b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.20 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IA



a) Búsqueda en profundidad “DFS”

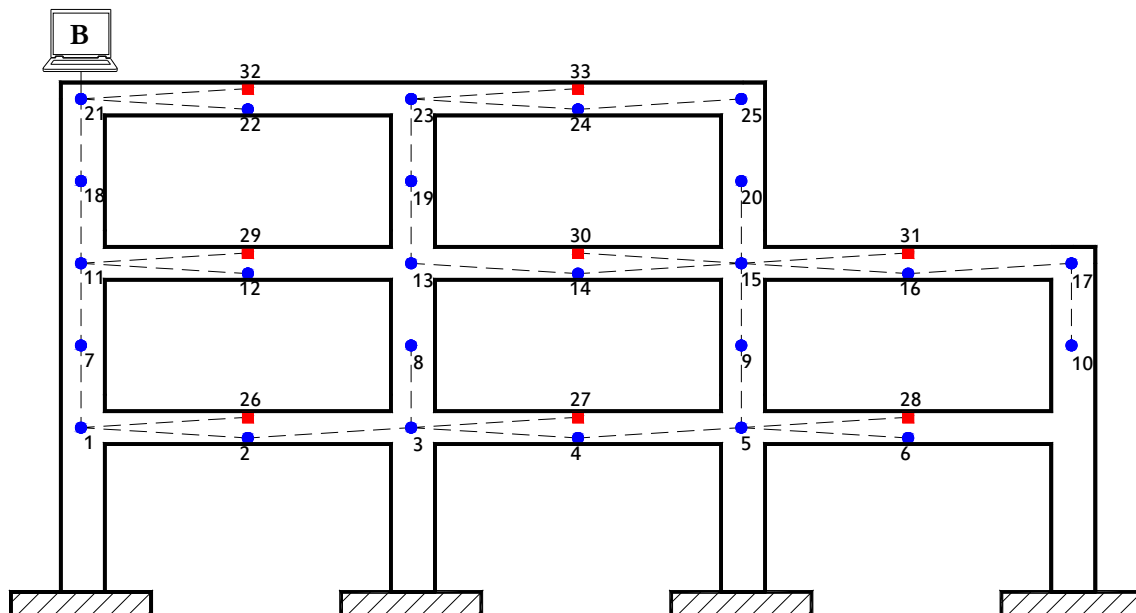
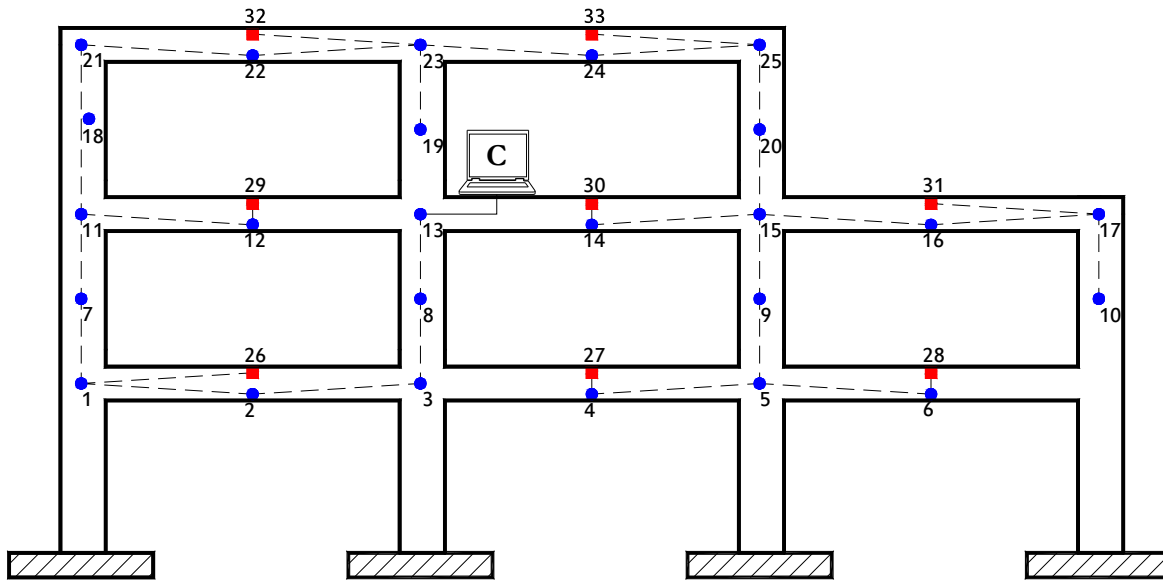
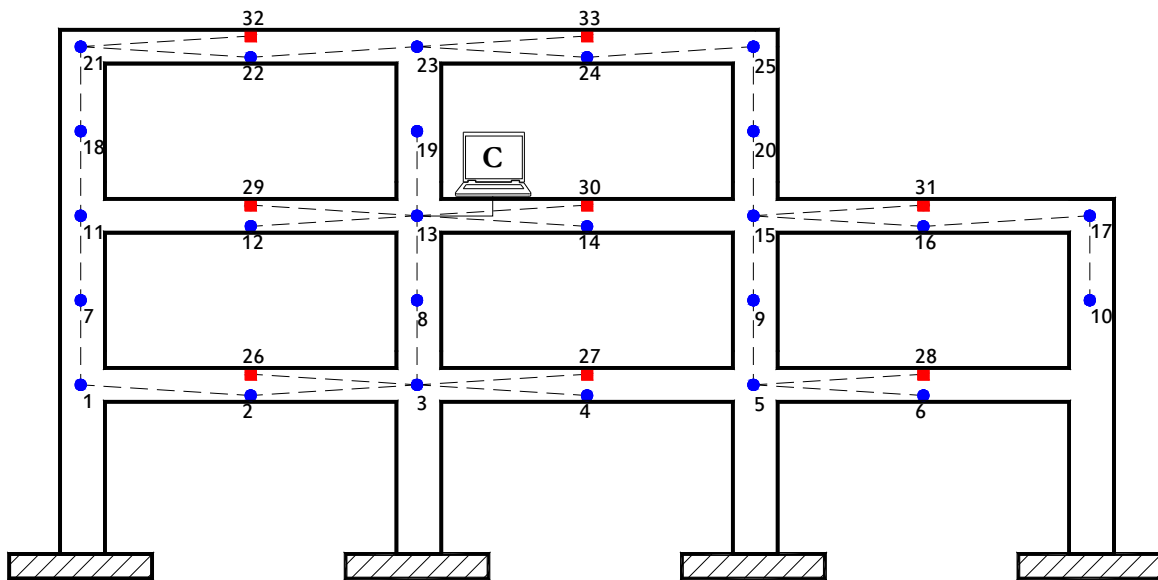
**b) Búsqueda en amplitud “PI”**

Figura 6.21 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IB

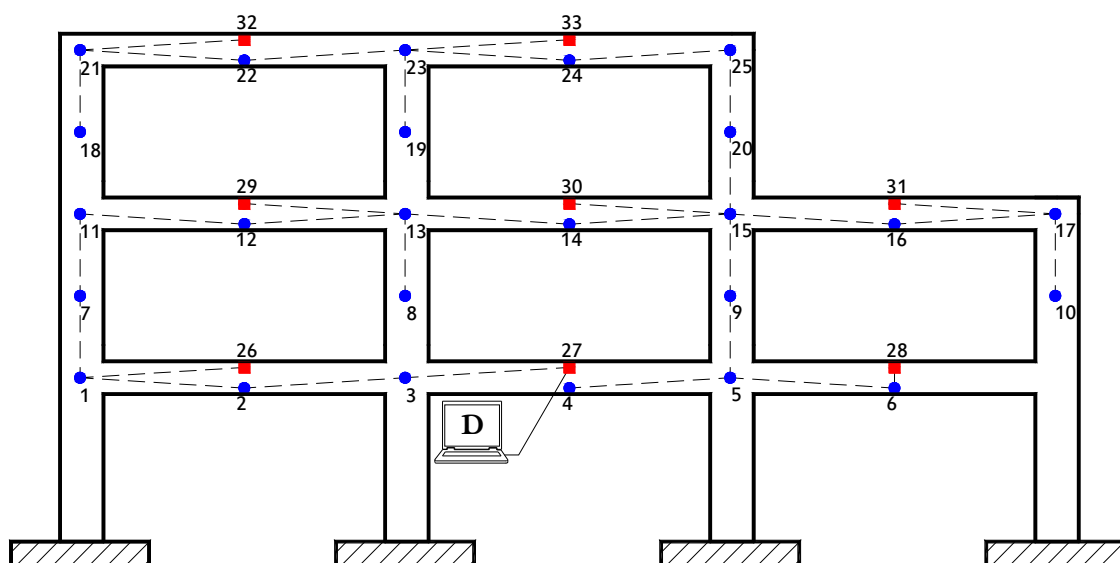


a) Búsqueda en profundidad “DFS”

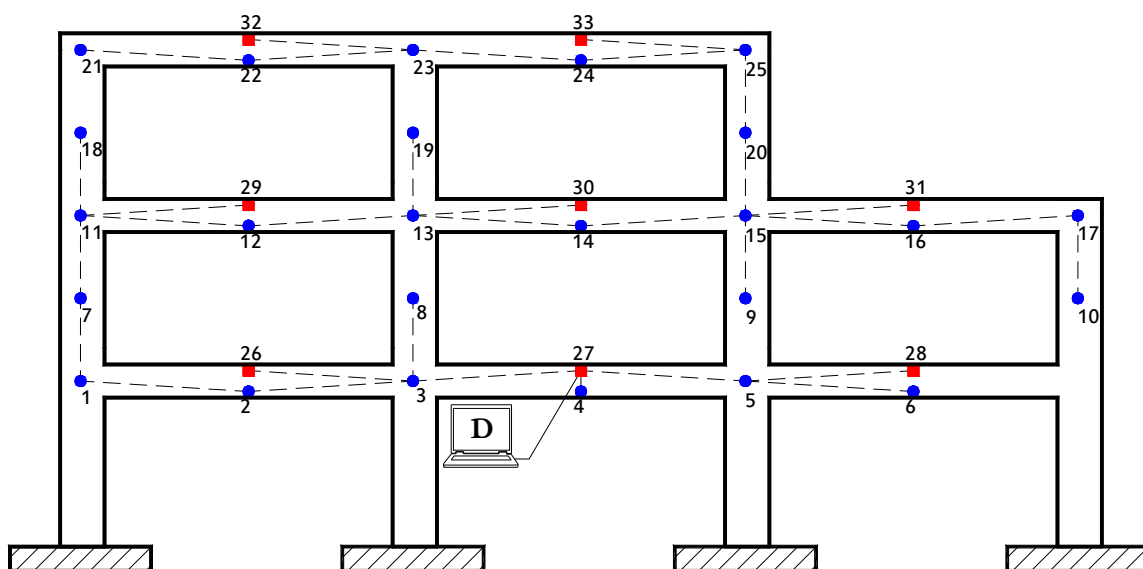


b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.22 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IC



a) Búsqueda en profundidad "DFS"



b) Búsqueda en amplitud "PI"

Figura 6.23 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-ID

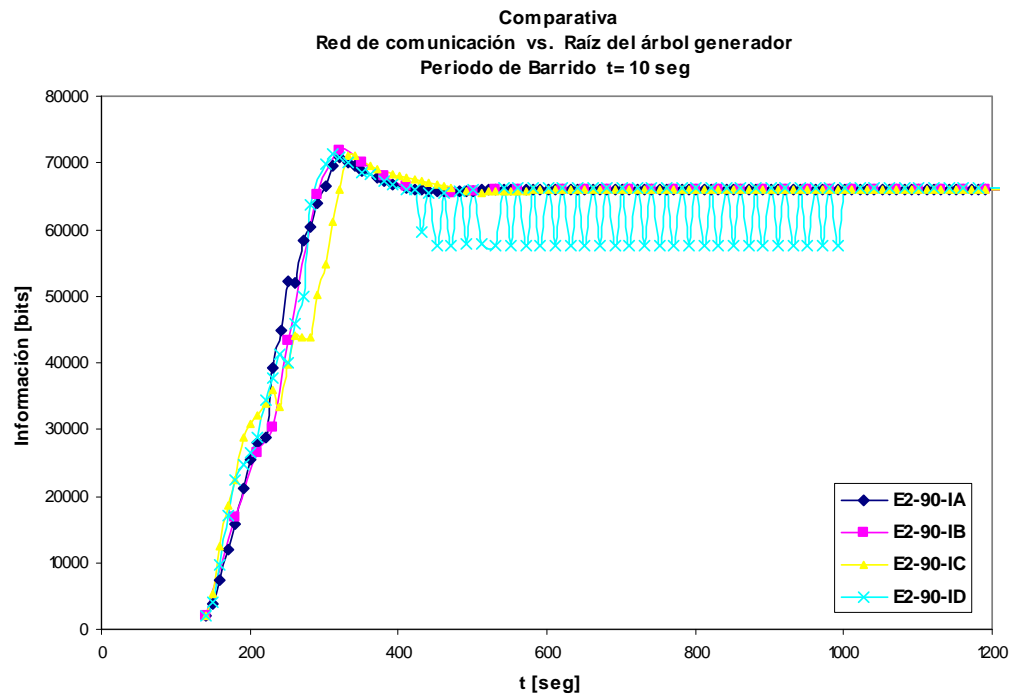


Figura 6.24 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 10$ seg.

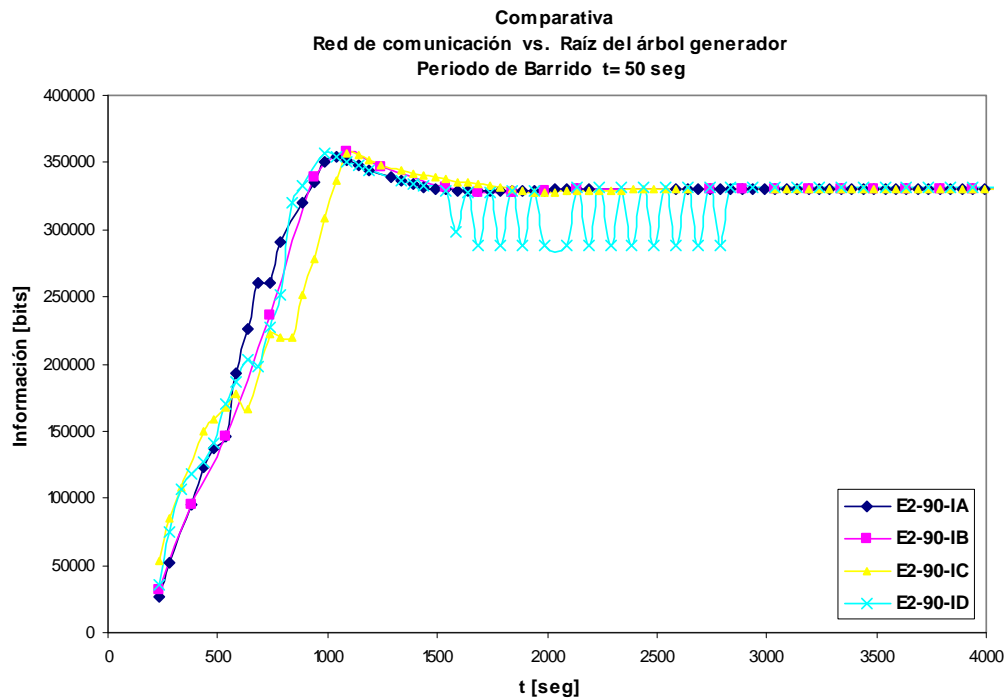


Figura 6.25 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 50$ seg.

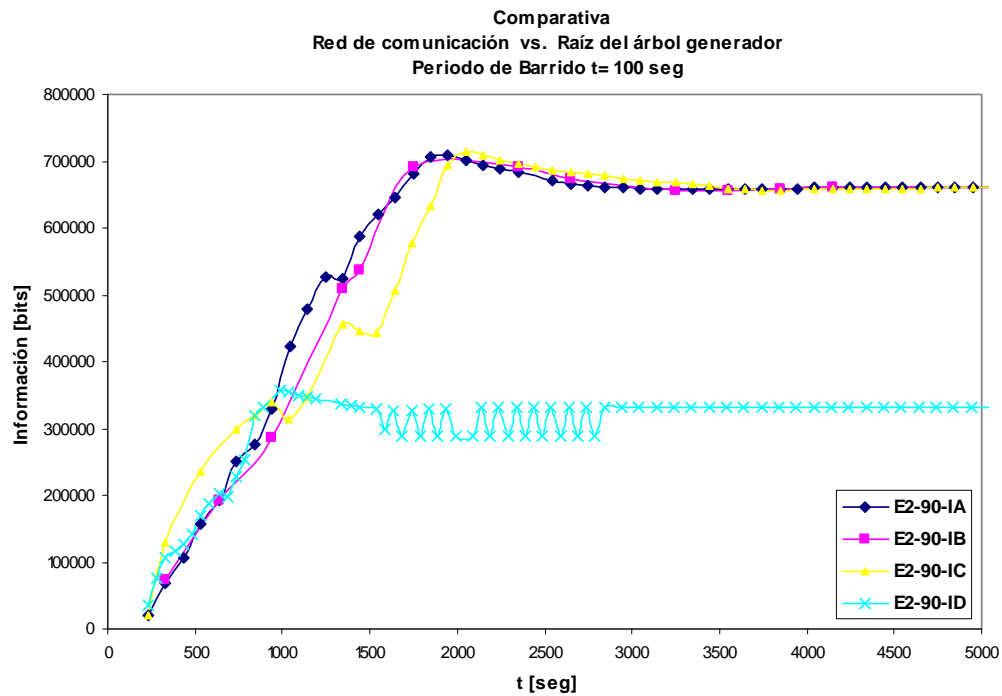


Figura 6.26 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 100$ seg.

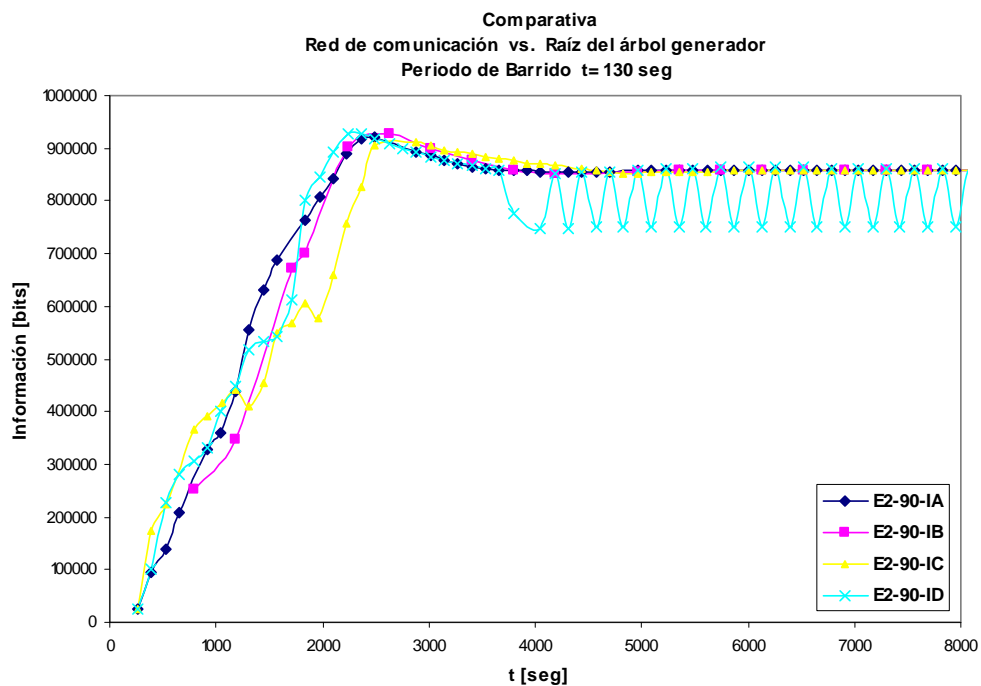


Figura 6.27 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 130$ seg.

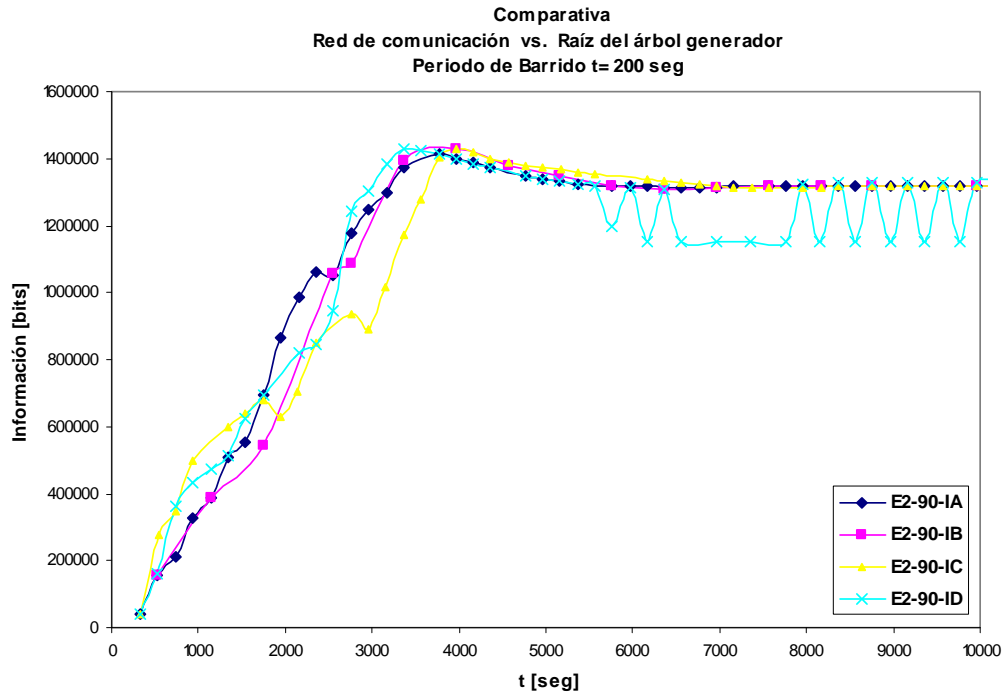


Figura 6.28 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 200$ seg.

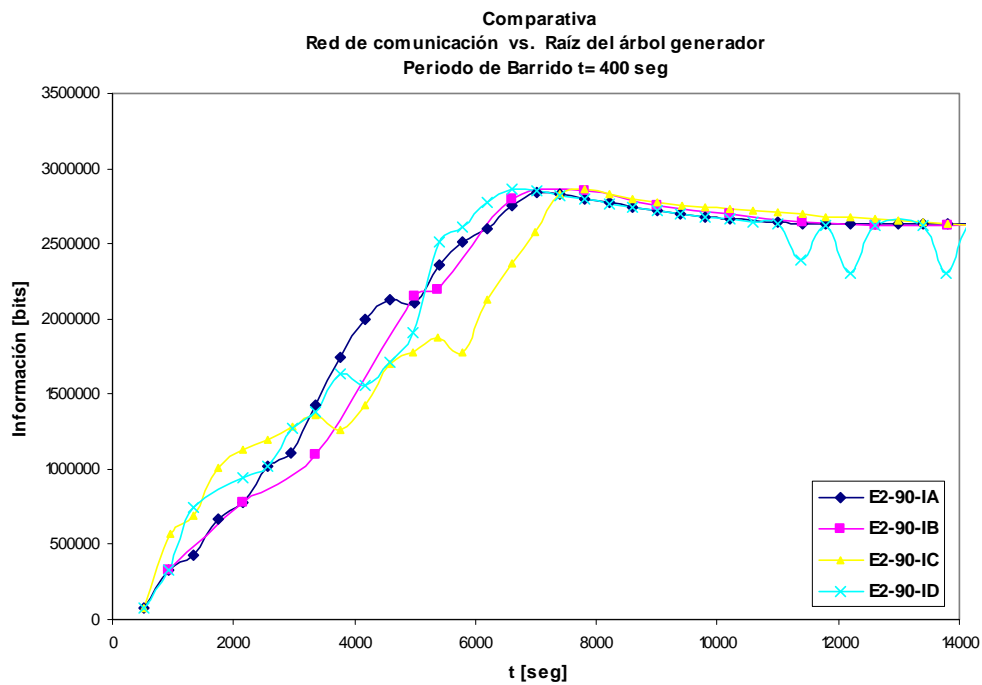
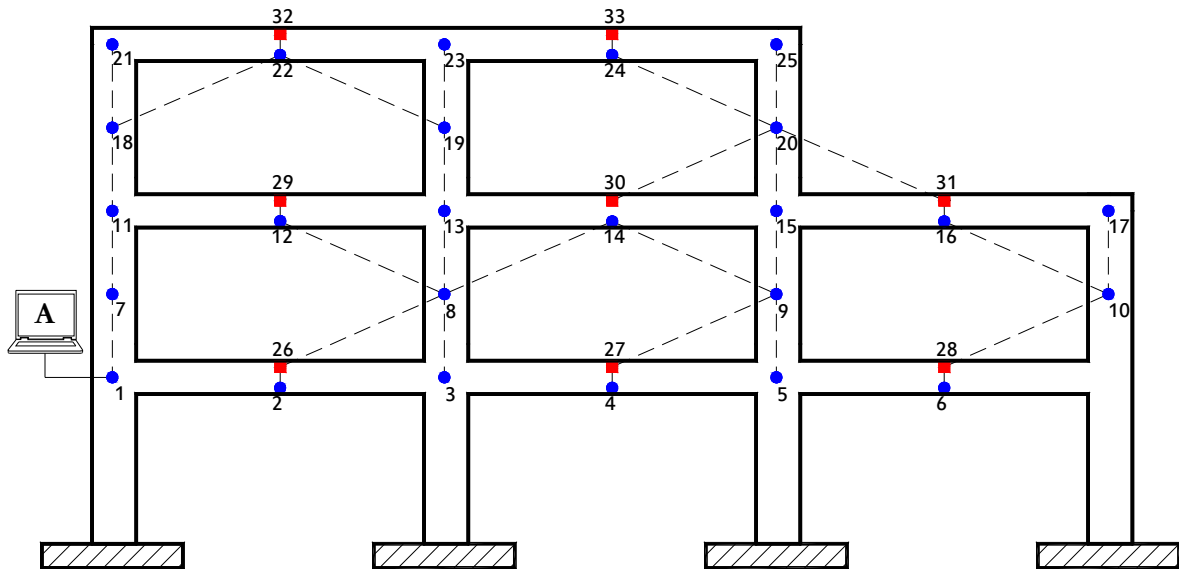


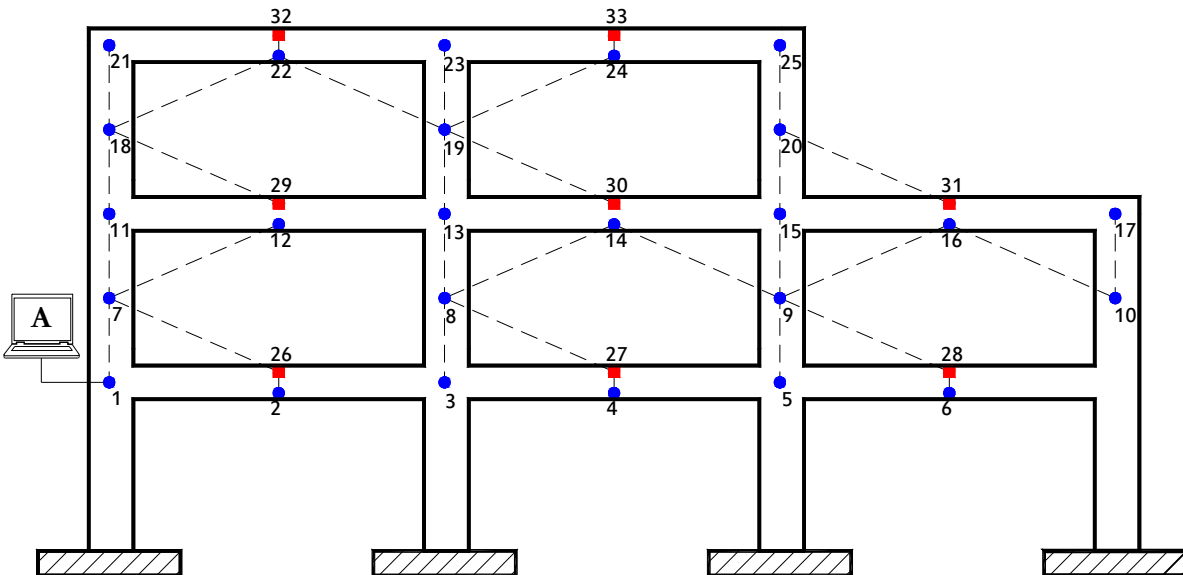
Figura 6.29 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 400$ seg.

CAPÍTULO 6. CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

VI.8.2 E2-90-IIA, E2-90-IIB, E2-90-IIC y E2-90-IIIE

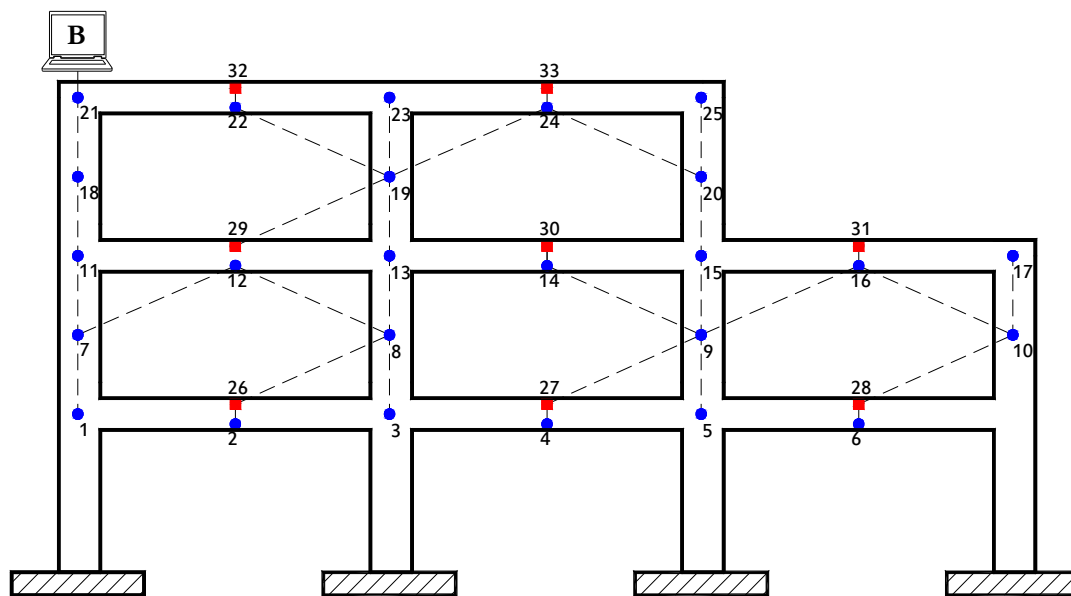


a) Búsqueda en profundidad “DFS”

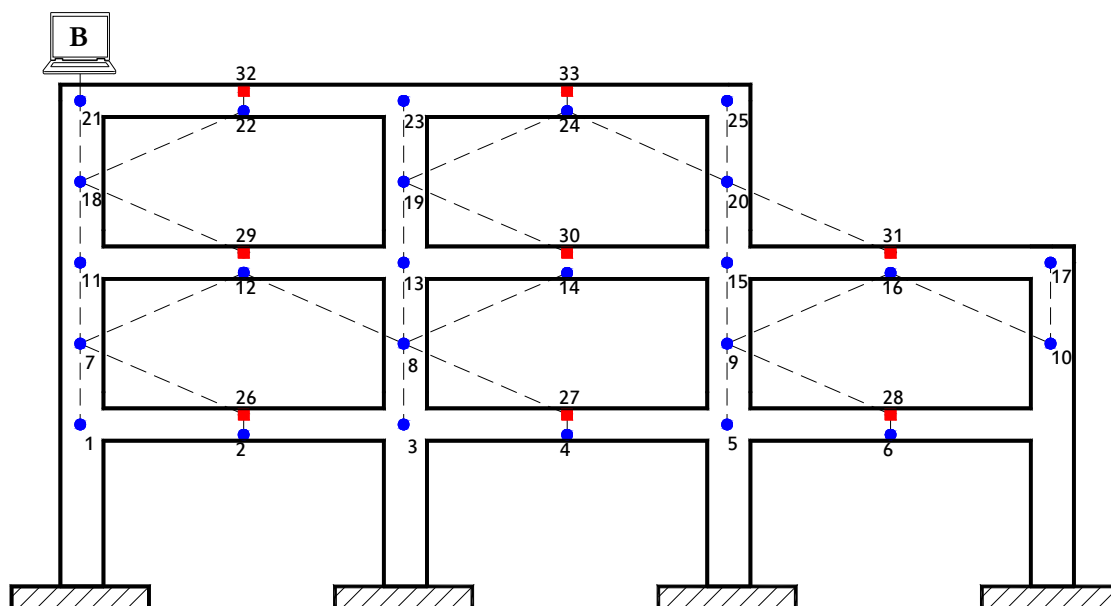


b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.30 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IIA

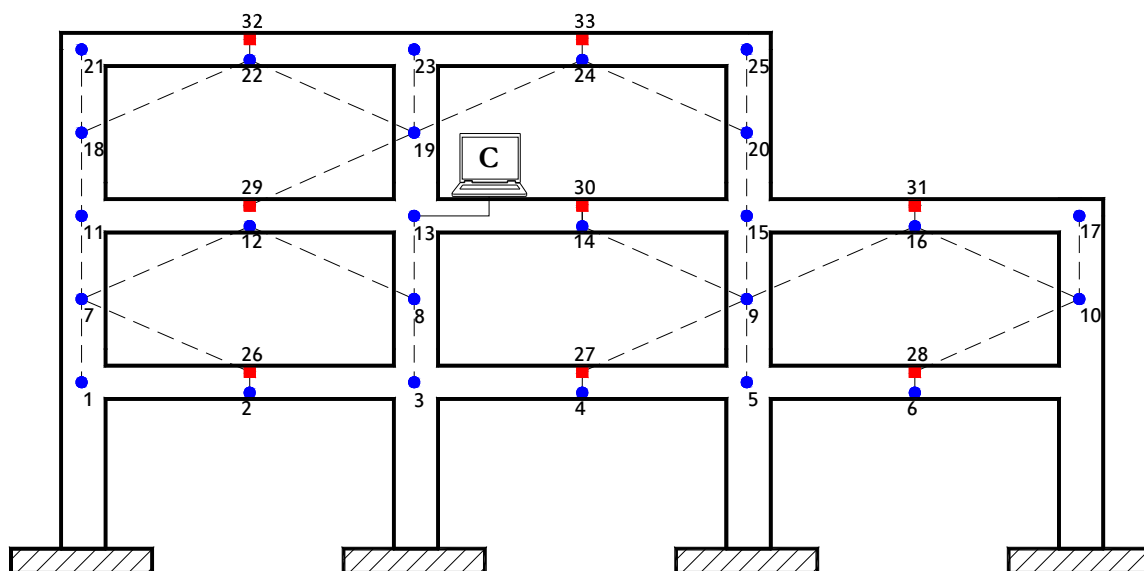


a) Búsqueda en profundidad “DFS”

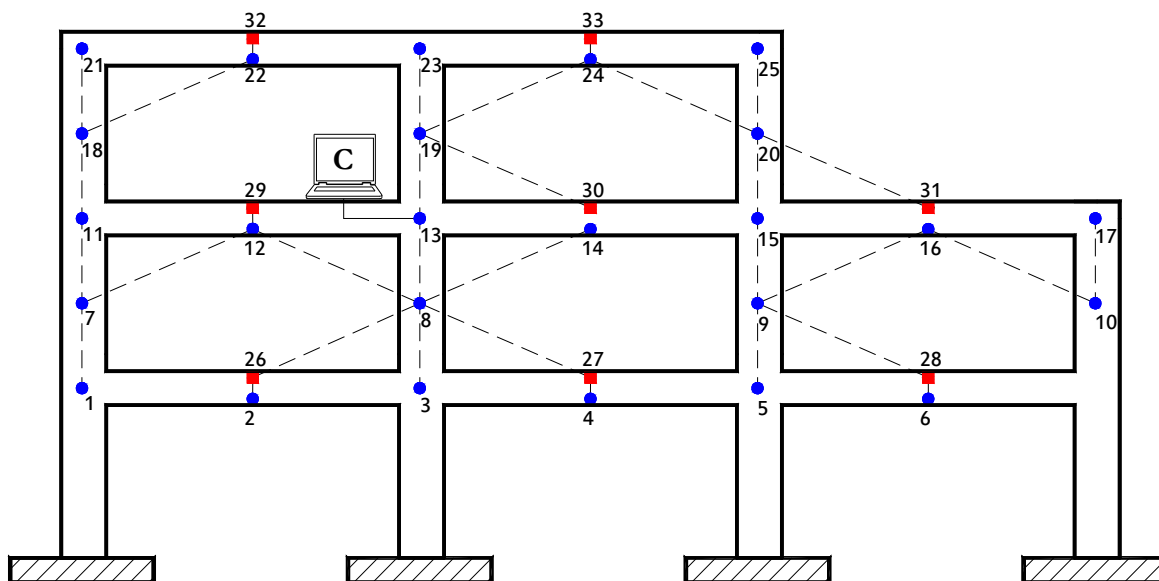


b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.31 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IIB

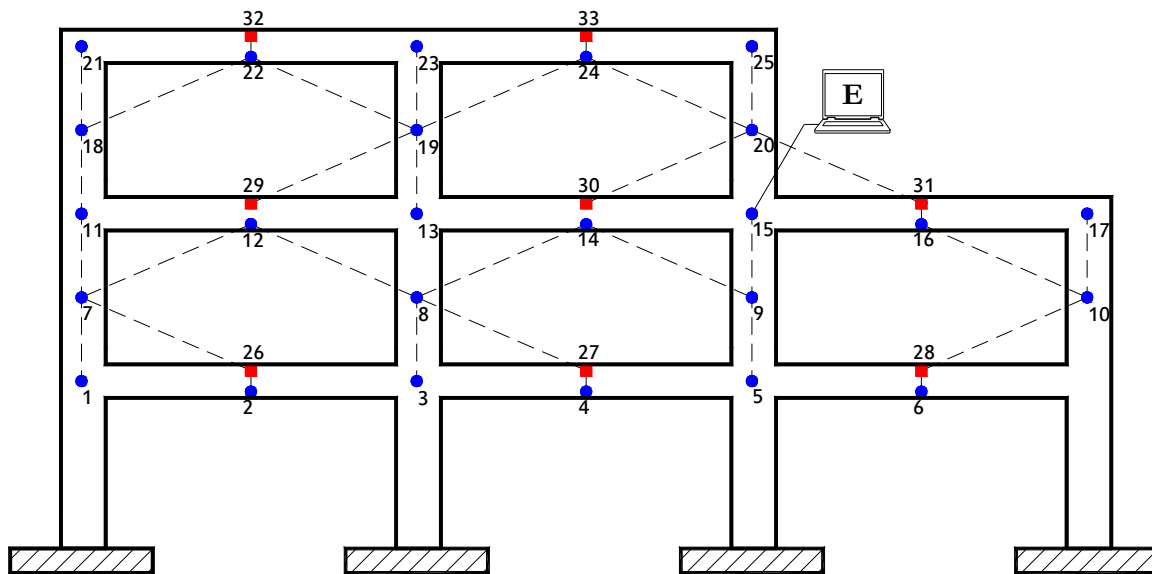


a) Búsqueda en profundidad “DFS”

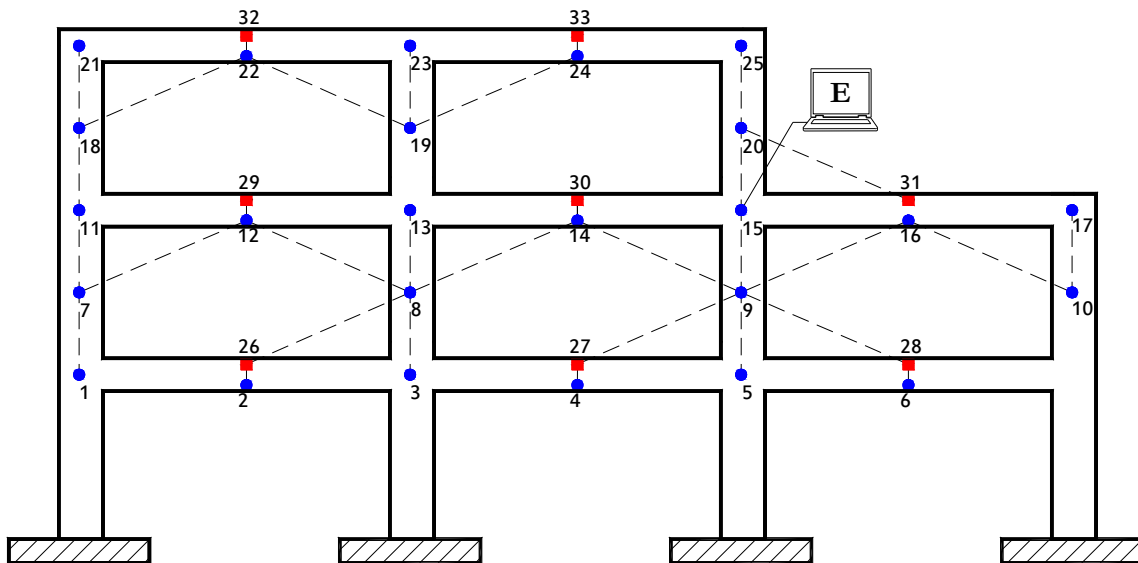


b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.32 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IIC



a) Búsqueda en profundidad “DFS”



b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.33 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IIE

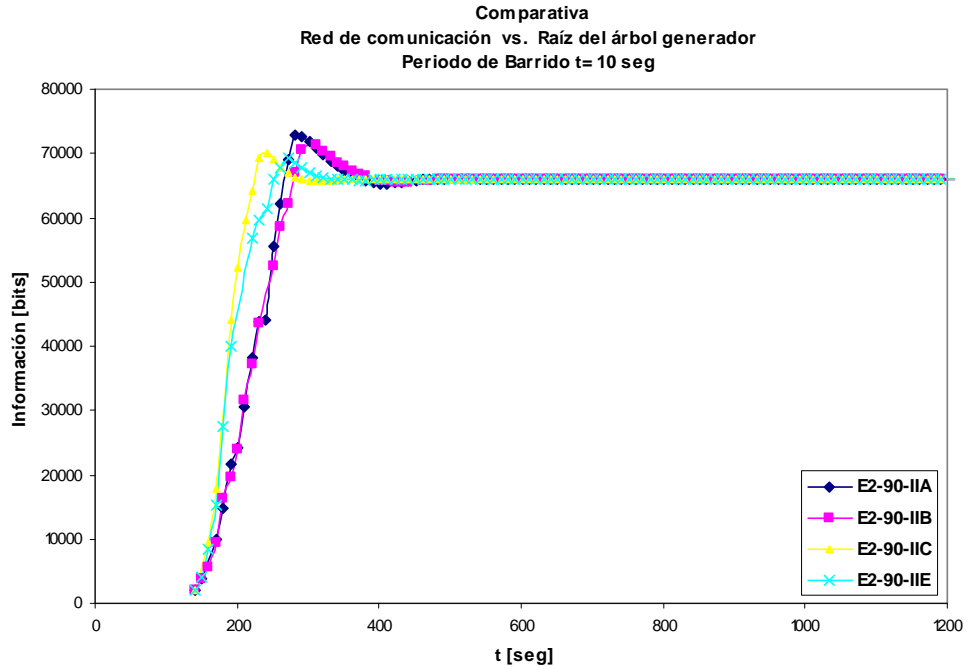


Figura 6.34 Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 10 seg.

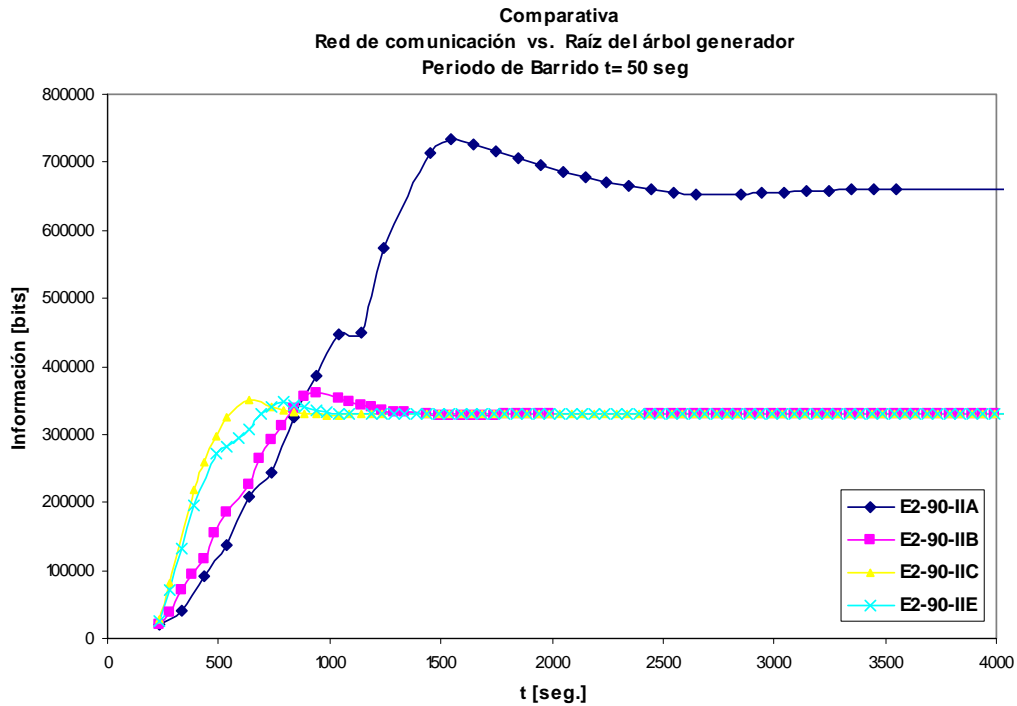


Figura 6.35 Información almacenada en la computadora central durante la simulación t = 50 seg.

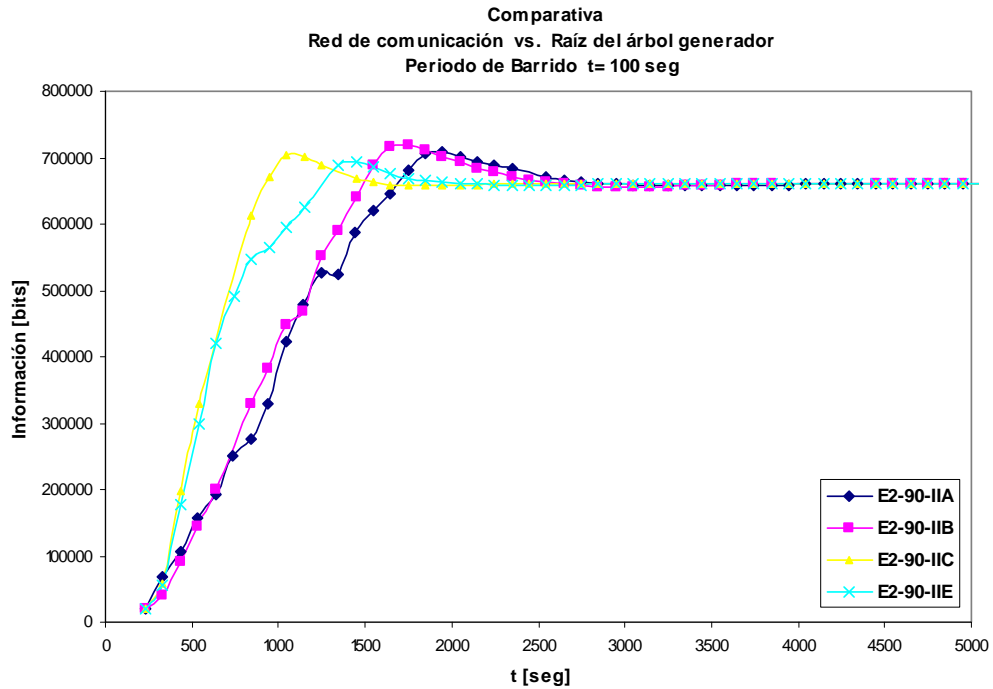


Figura 6.36 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 100$ seg.

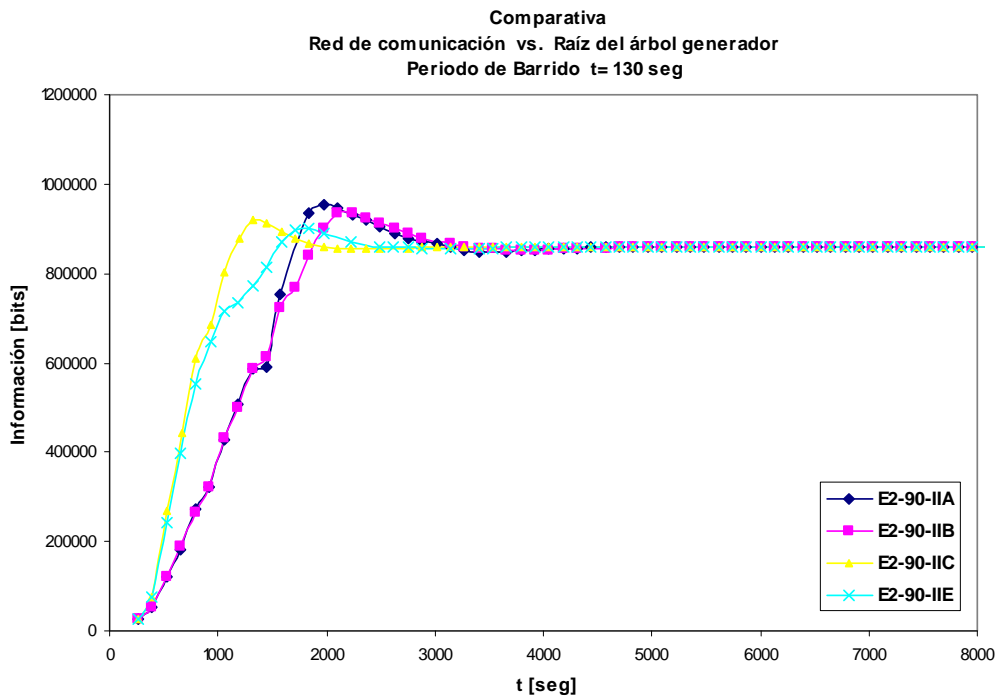


Figura 6.37 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 130$ seg.

CAPÍTULO 6. CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

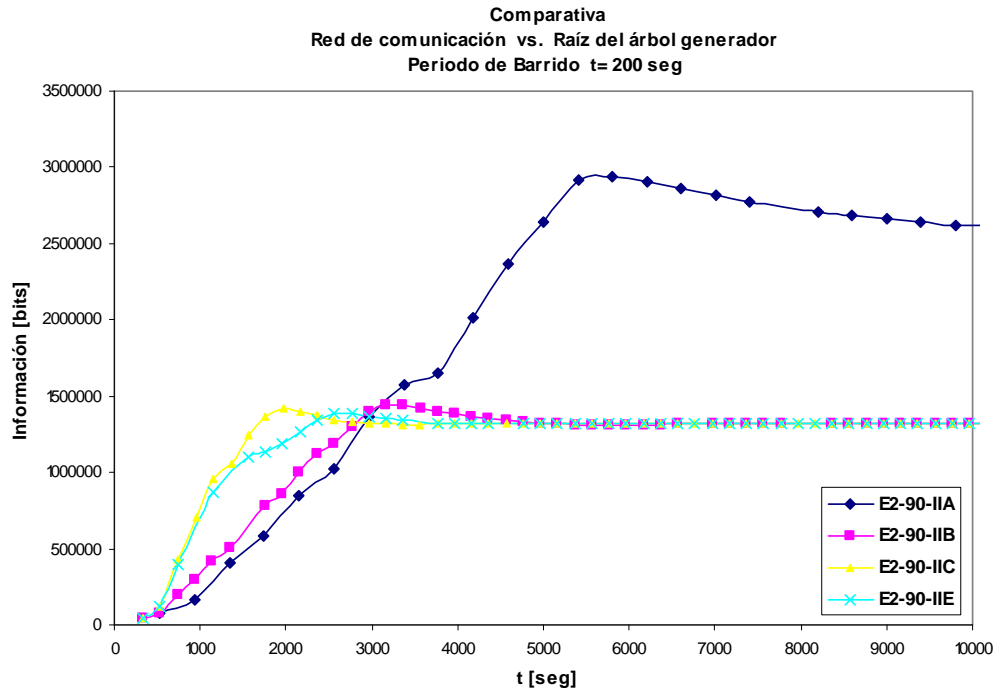


Figura 6.38 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 200$ seg.

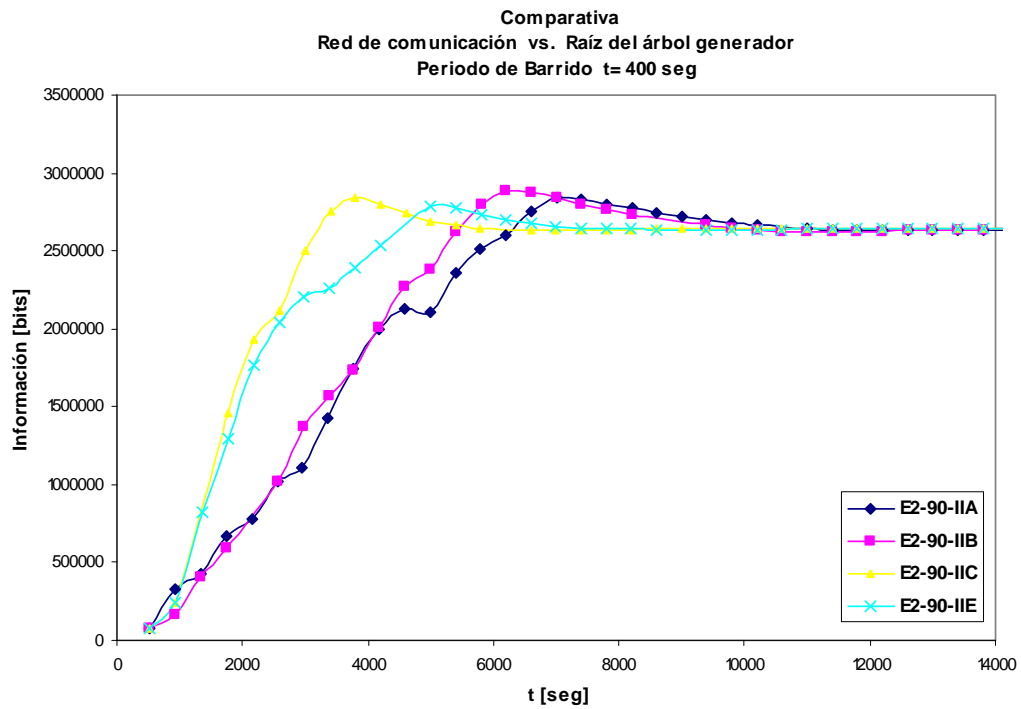


Figura 6.39 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 400$ seg.

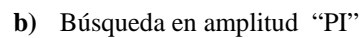
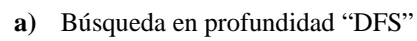
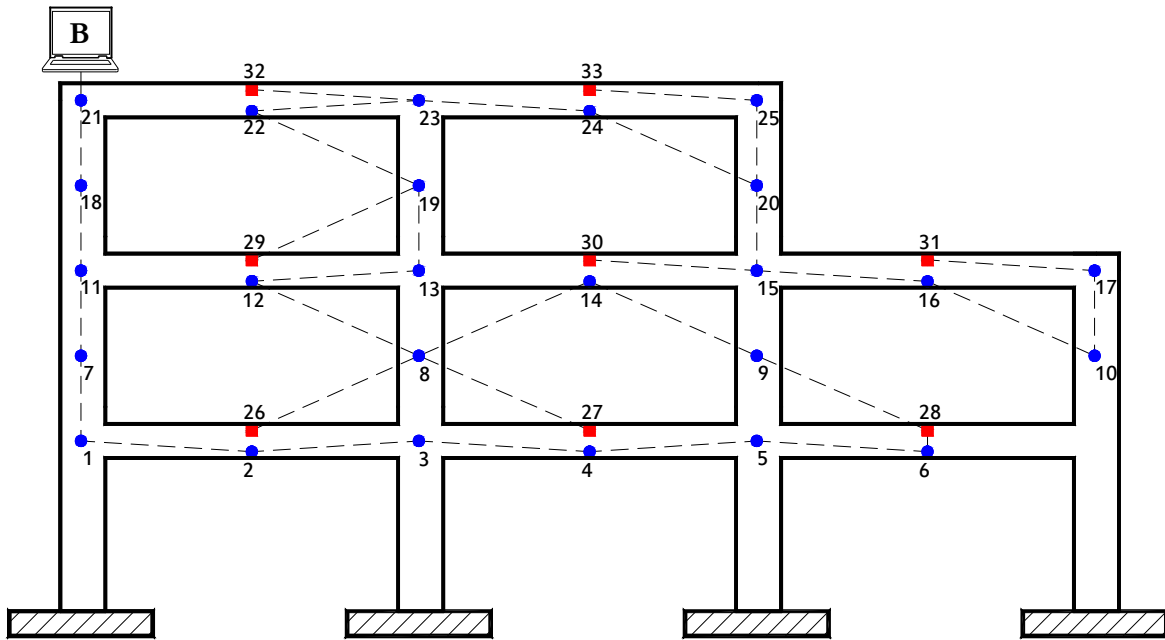
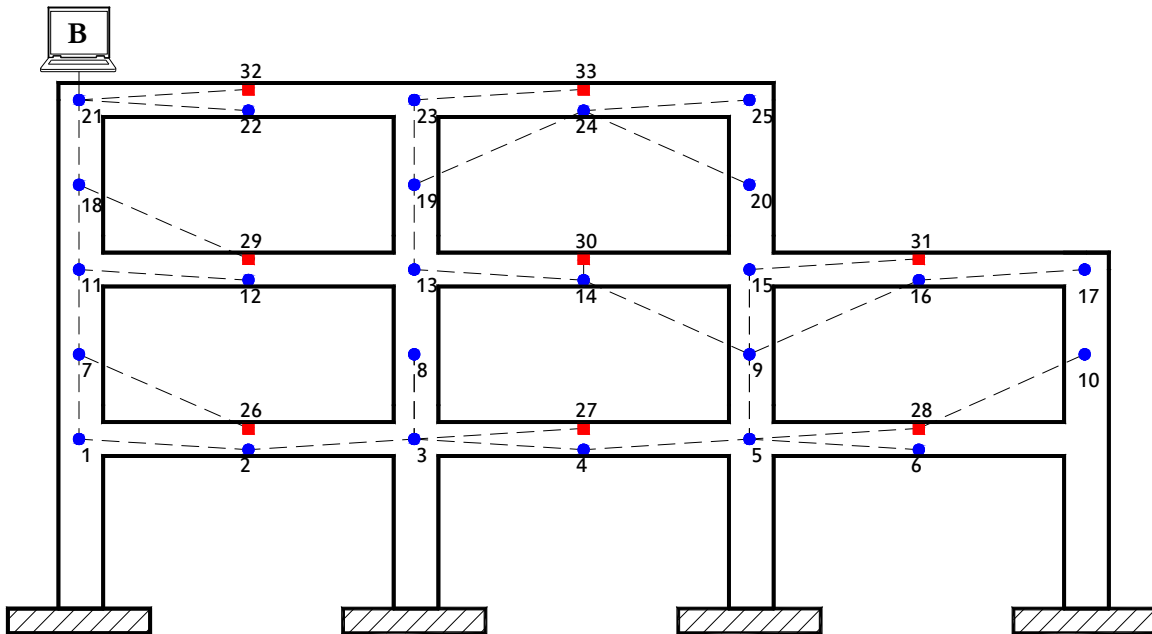


Figura 6.40 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-III A

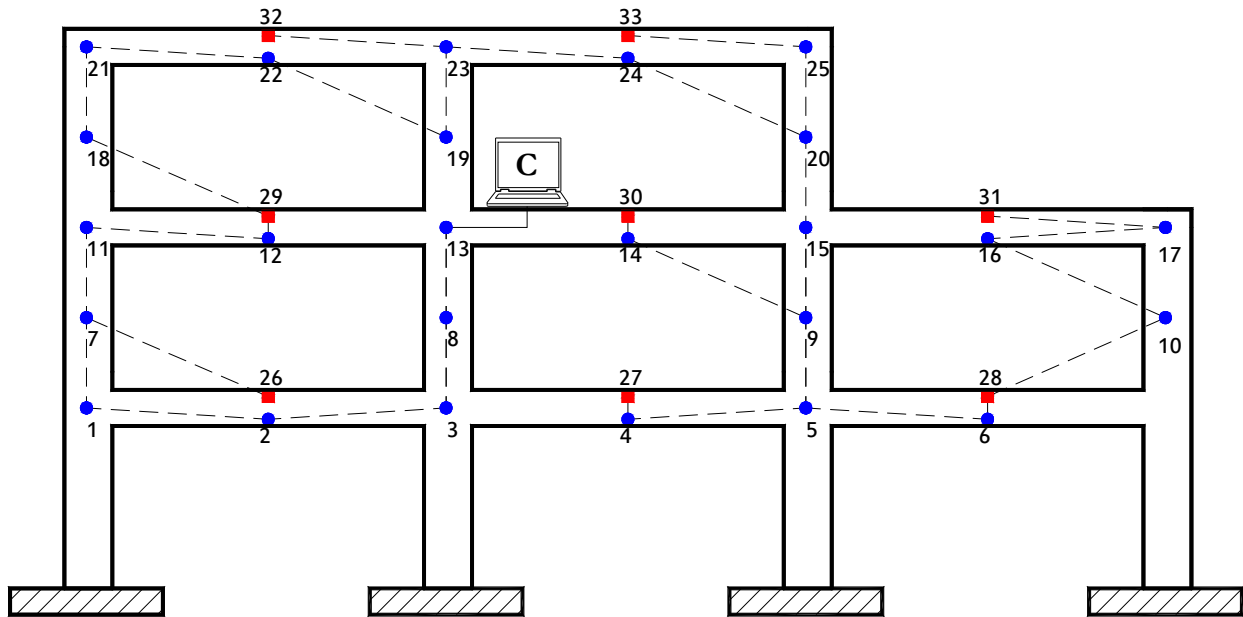


a) Búsqueda en profundidad “DFS”

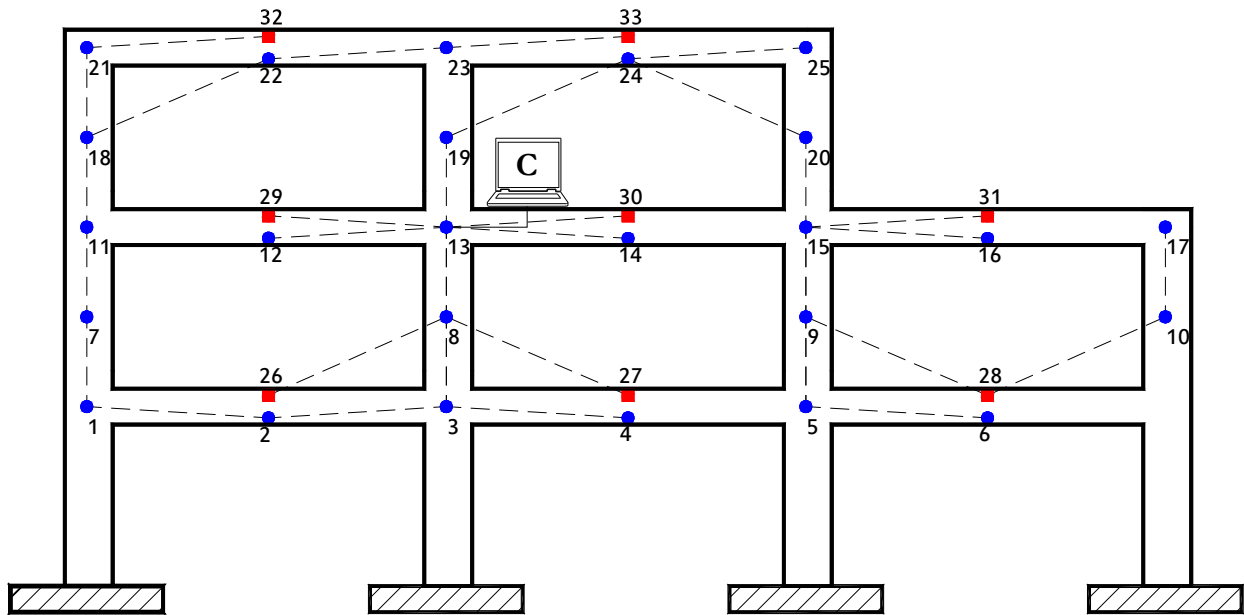


b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.41 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IIIB

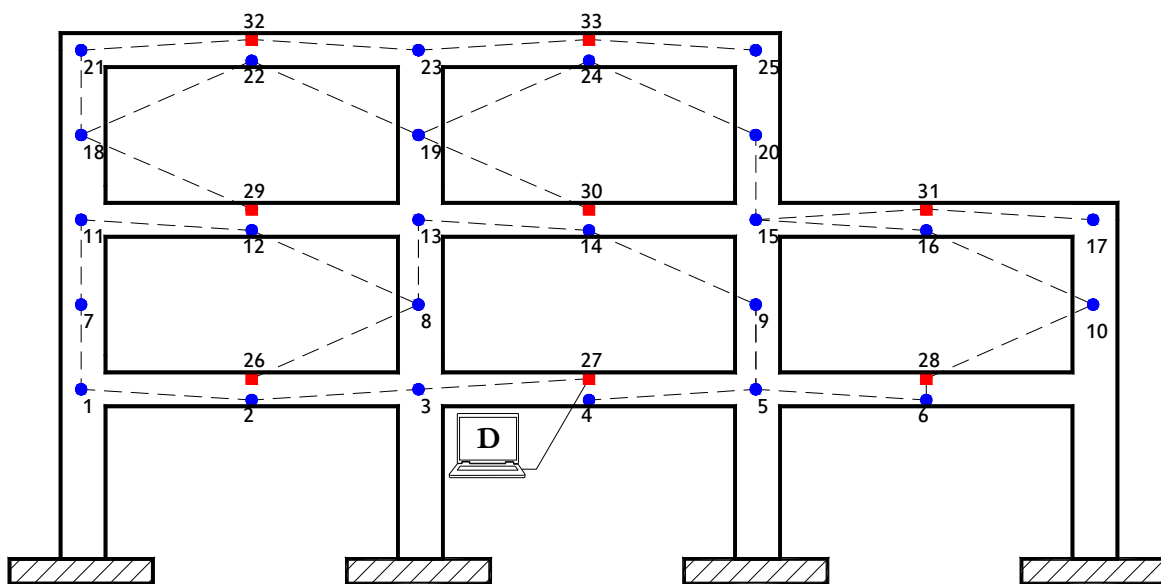


a) Búsqueda en profundidad "DFS"

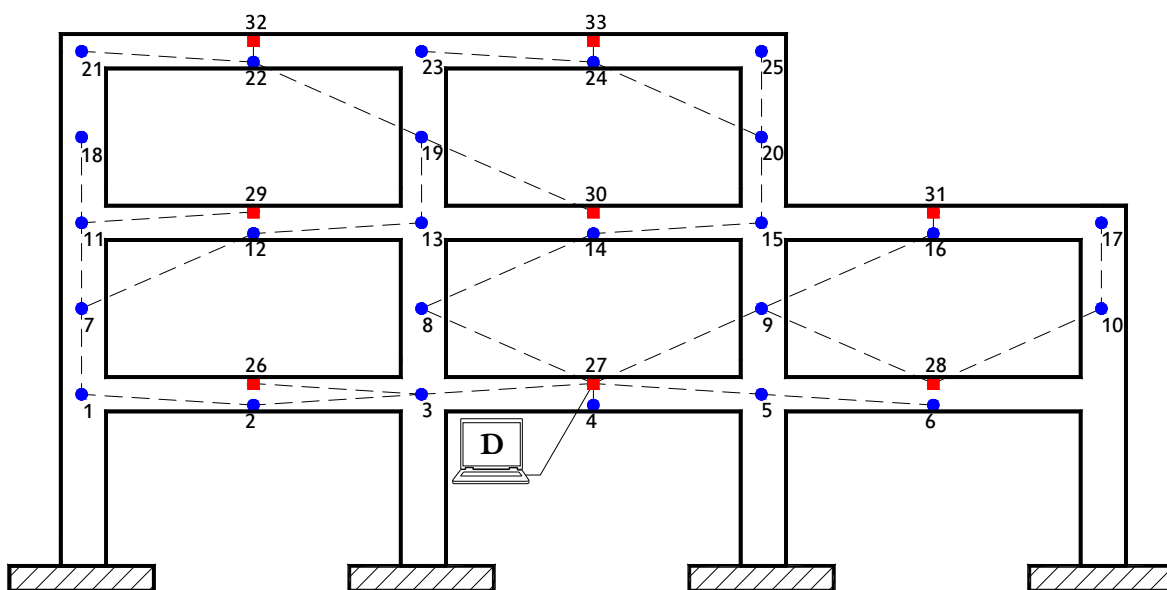


b) Búsqueda en amplitud "PI"

Figura 6.42 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IIIC

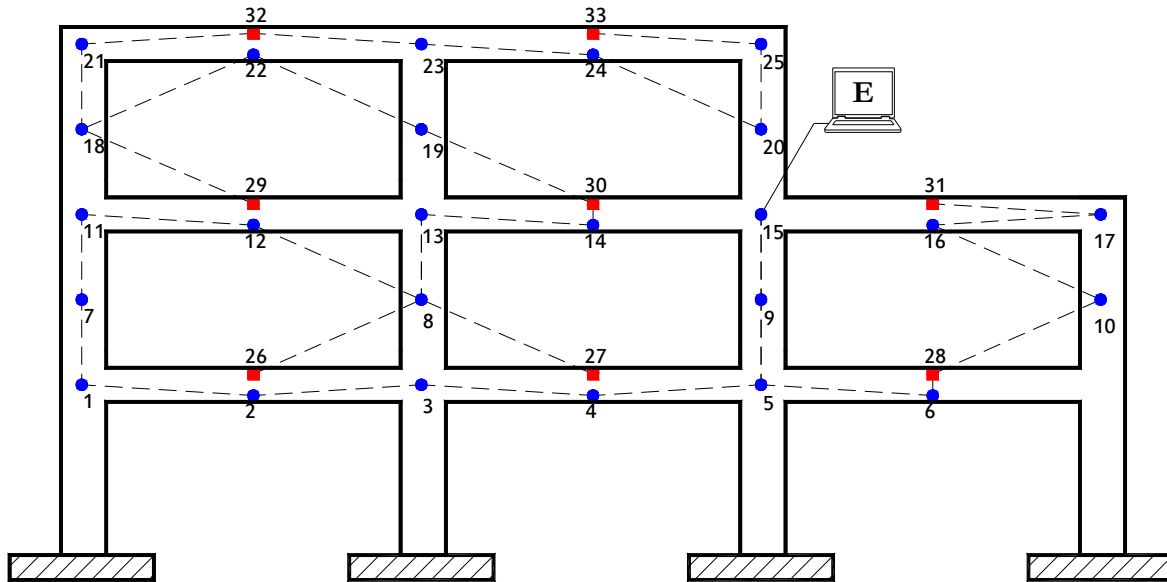


a) Búsqueda en profundidad “DFS”

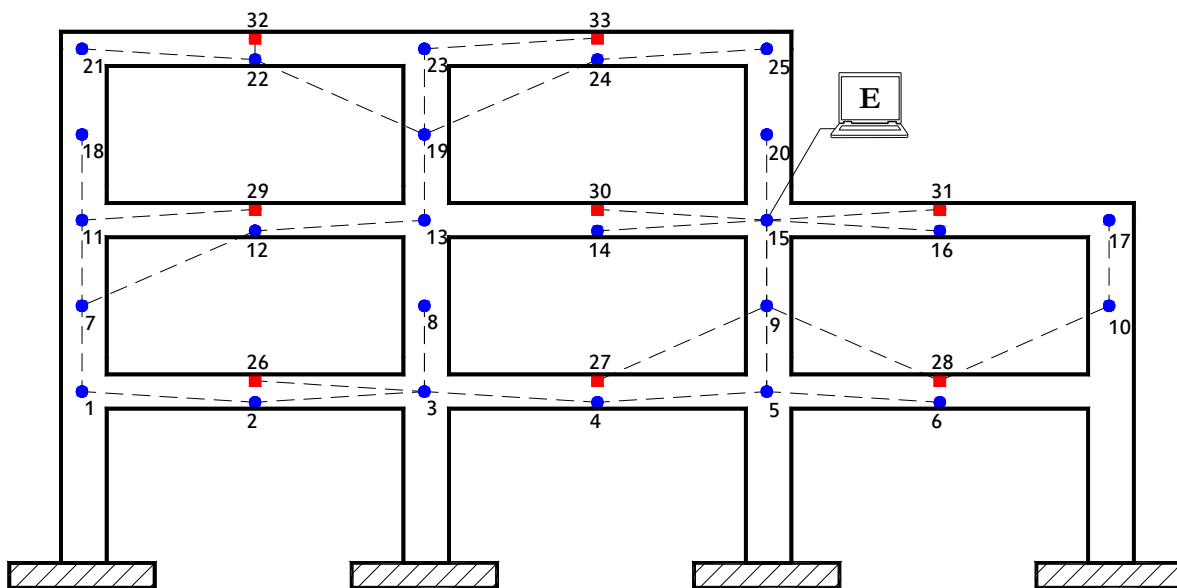


b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.43 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IIID



a) Búsqueda en profundidad “DFS”



b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.44 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IIIIE

CAPÍTULO 6. CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

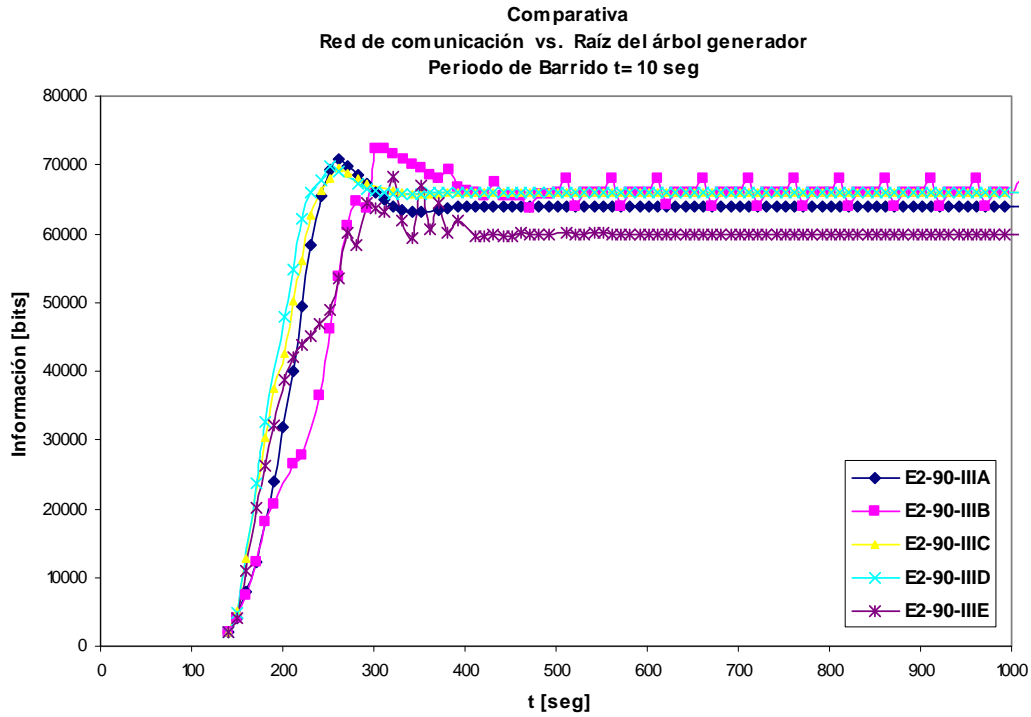


Figura 6.45 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 10$ seg.

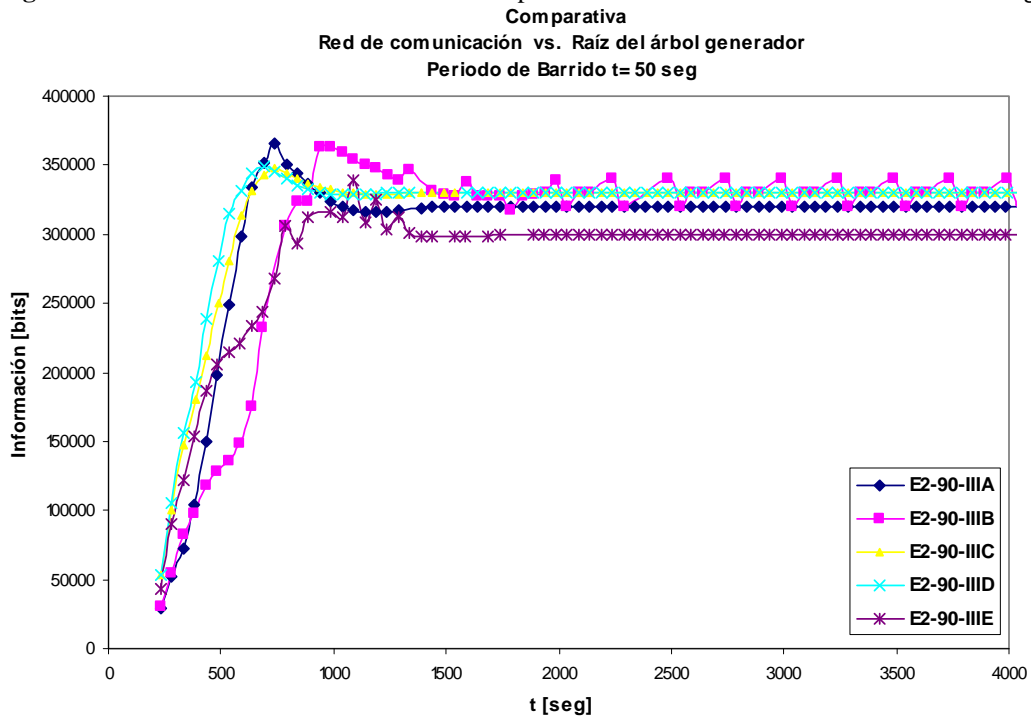


Figura 6.46 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 50$ seg.

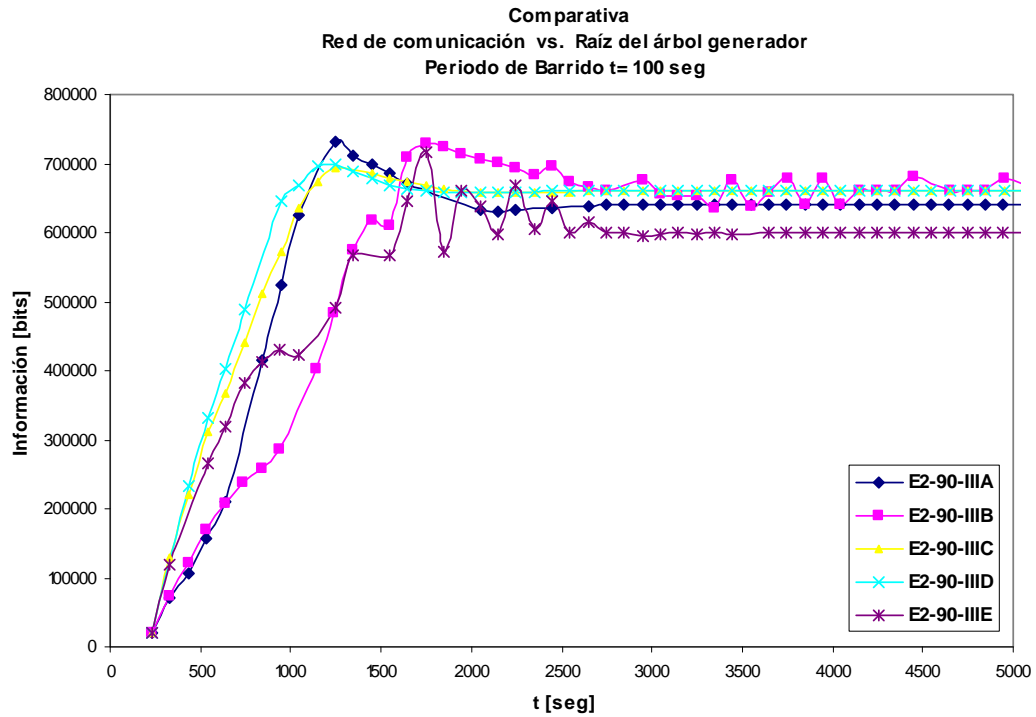


Figura 6.47 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 100$ seg.

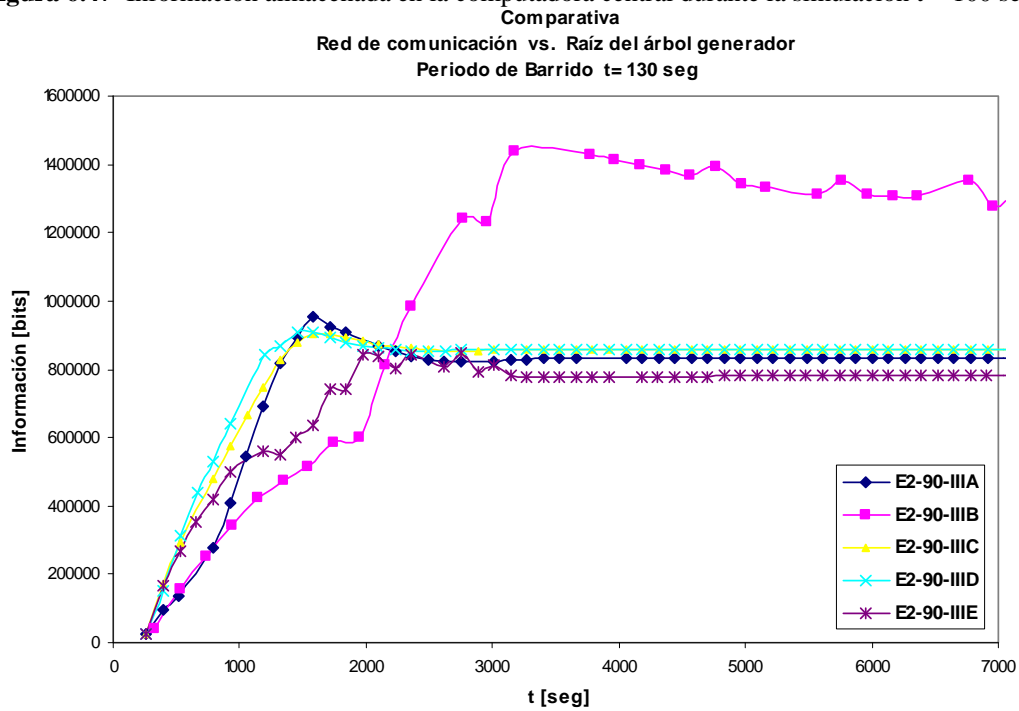


Figura 6.48 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 130$ seg.

CAPÍTULO 6. CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

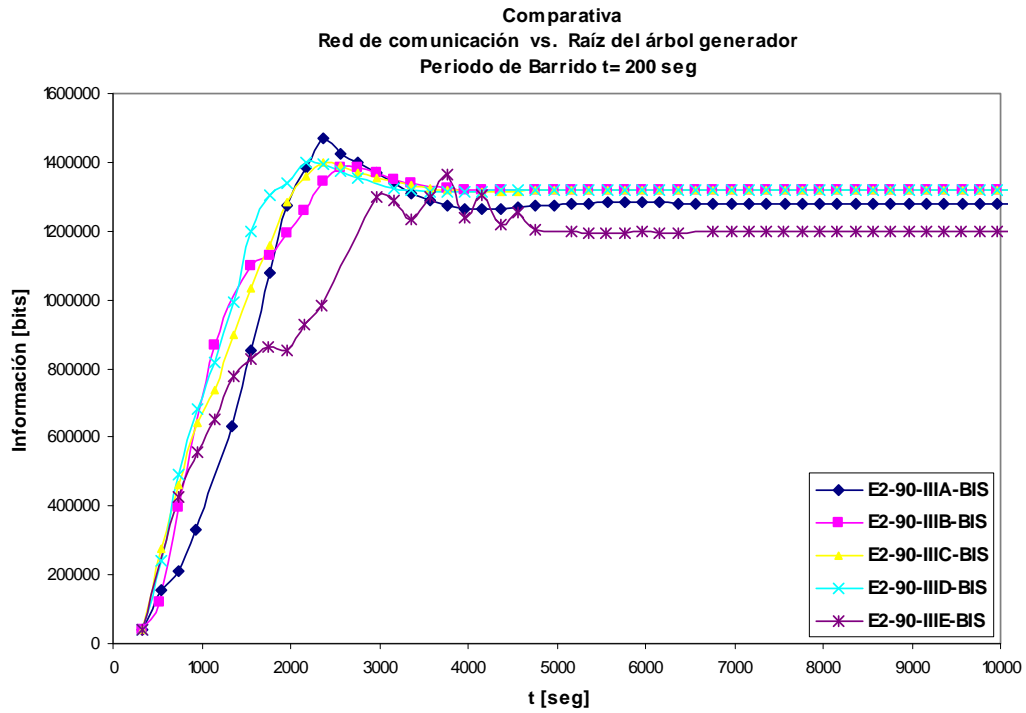


Figura 6.49 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 200$ seg.

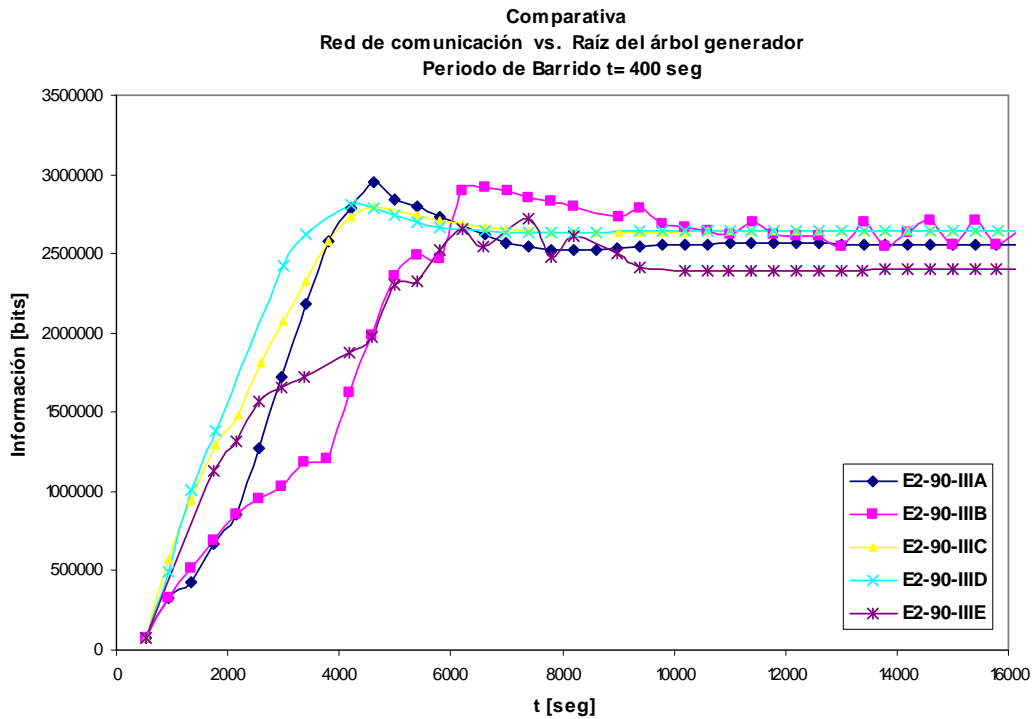
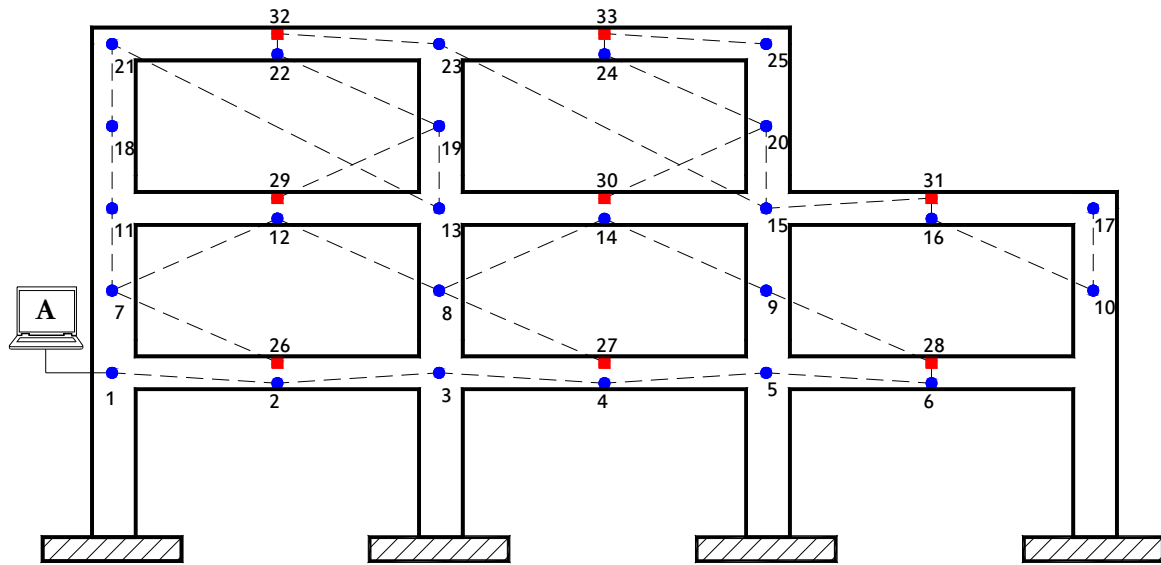
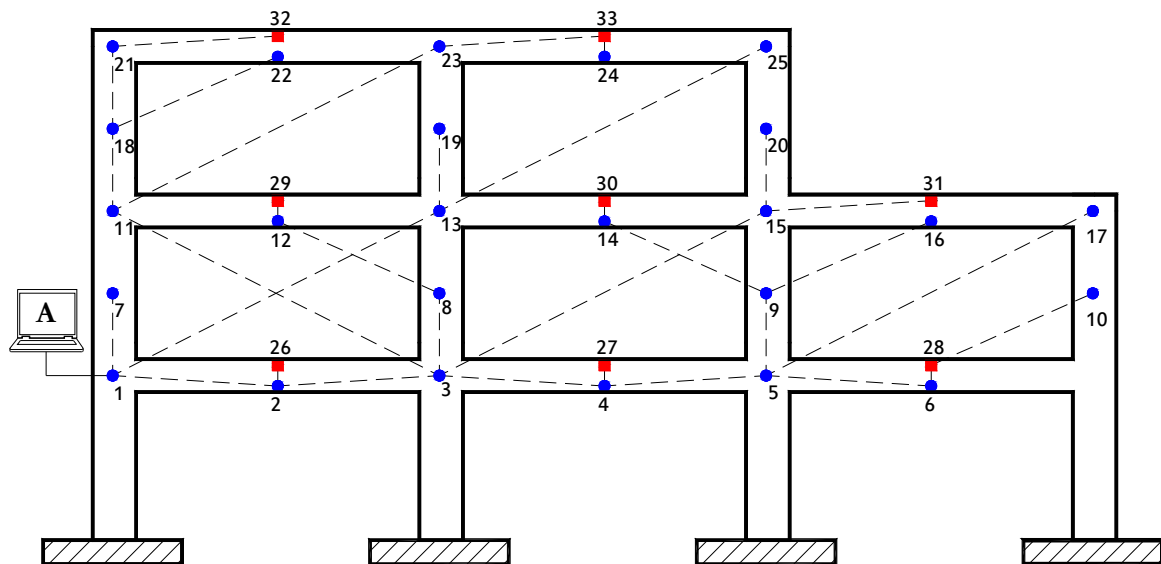


Figura 6.50 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 400$ seg.

VI.8.4 E2-90-IVA, E2-90-IVB, E2-90-IVC, E2-90-IVD y E2-90-IVE

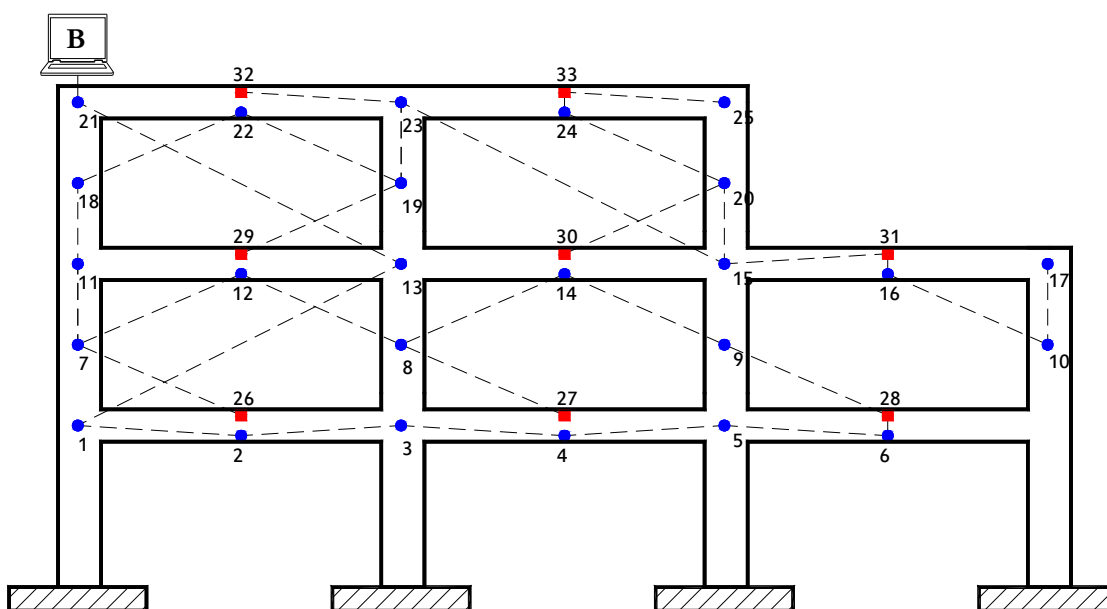


a) Búsqueda en profundidad “DFS”

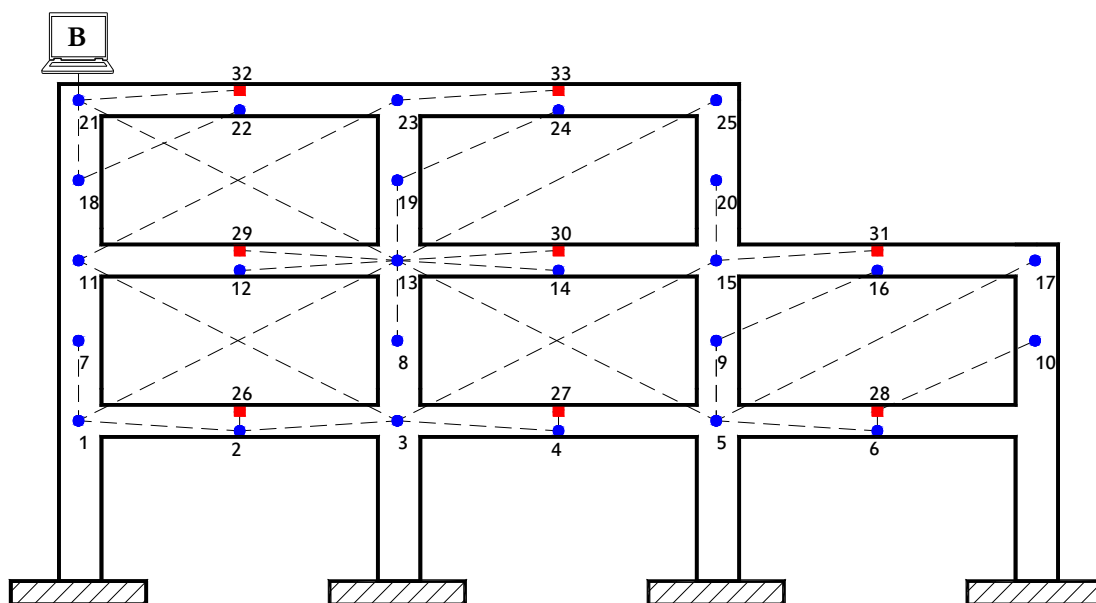


b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.51 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IVA

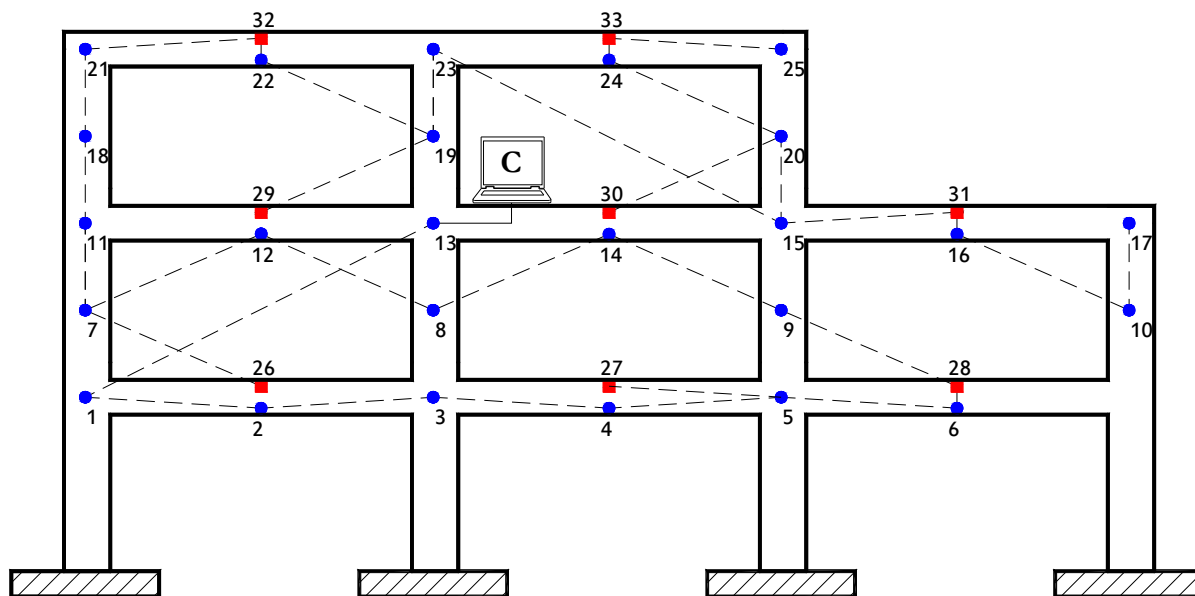


a) Búsqueda en profundidad “DFS”

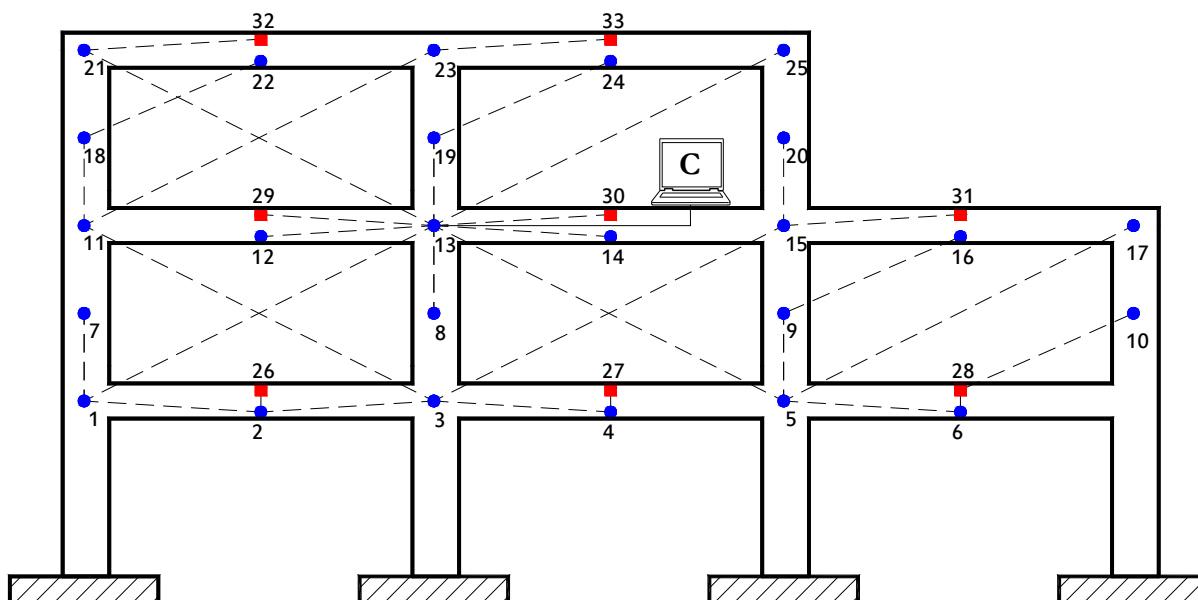


b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.52 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IVB

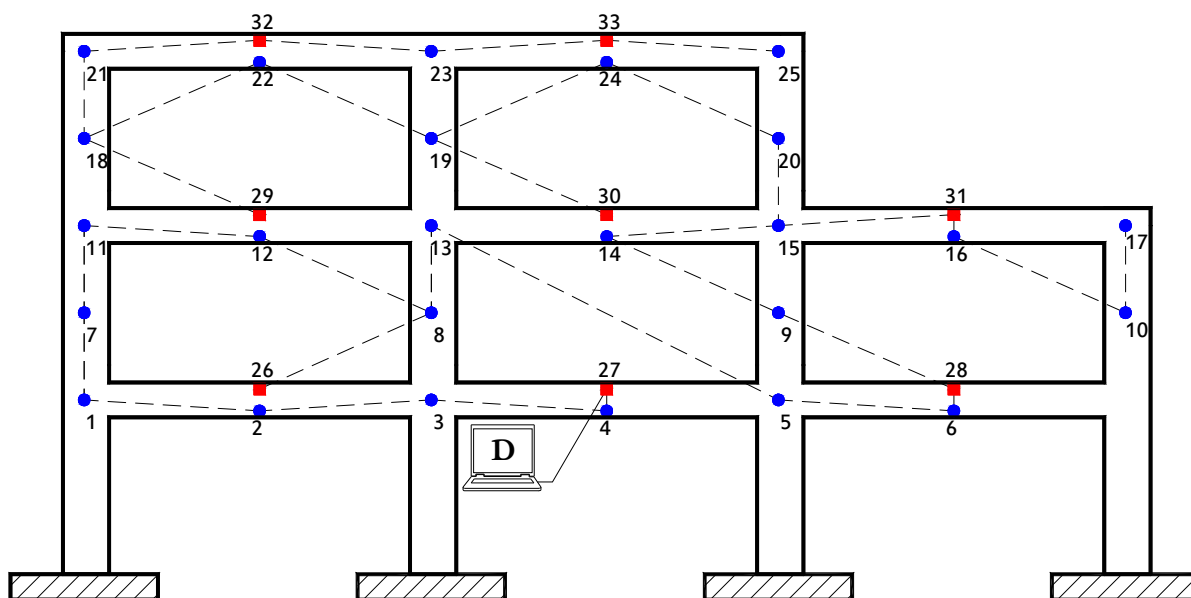


a) Búsqueda en profundidad "DFS"

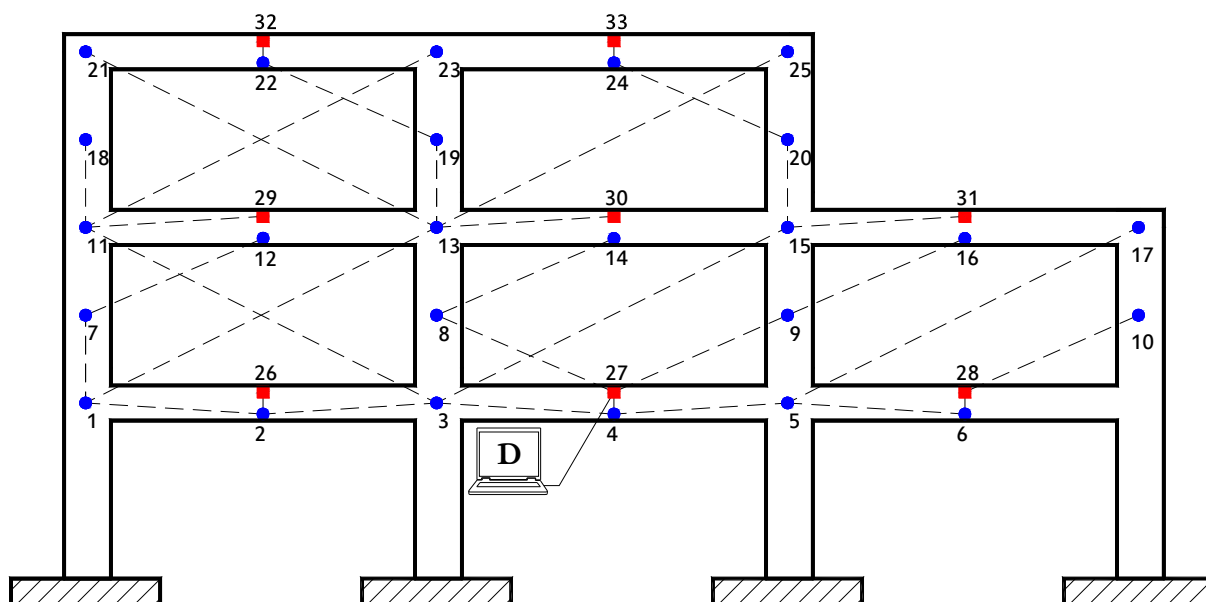


b) Búsqueda en amplitud "PI"

Figura 6.53 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IVC

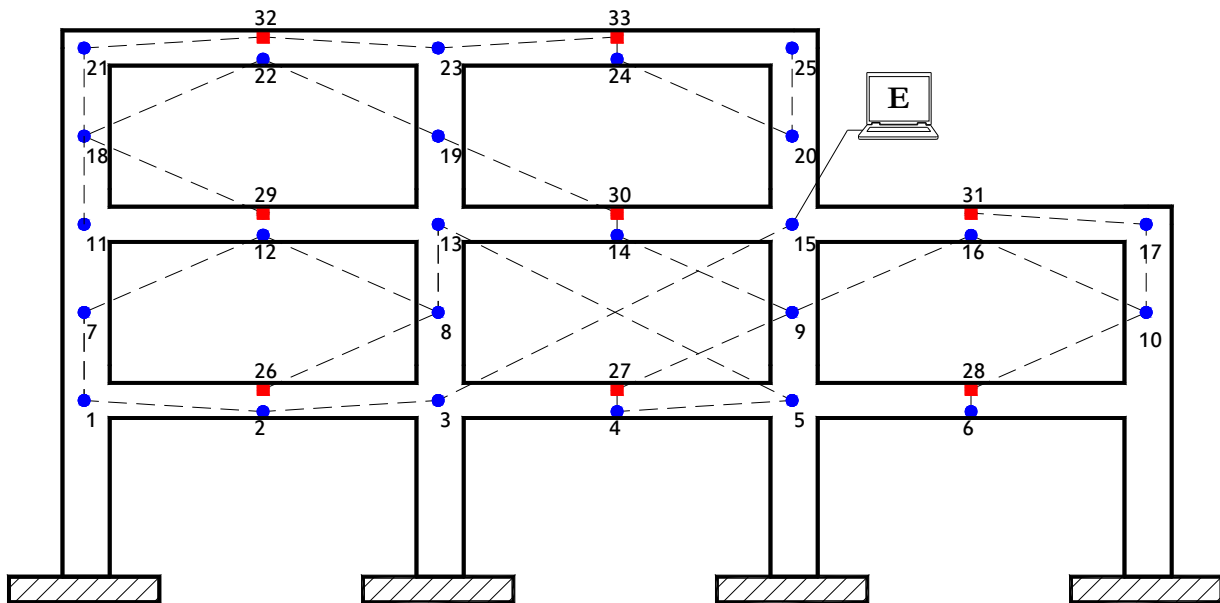


a) Búsqueda en profundidad "DFS"

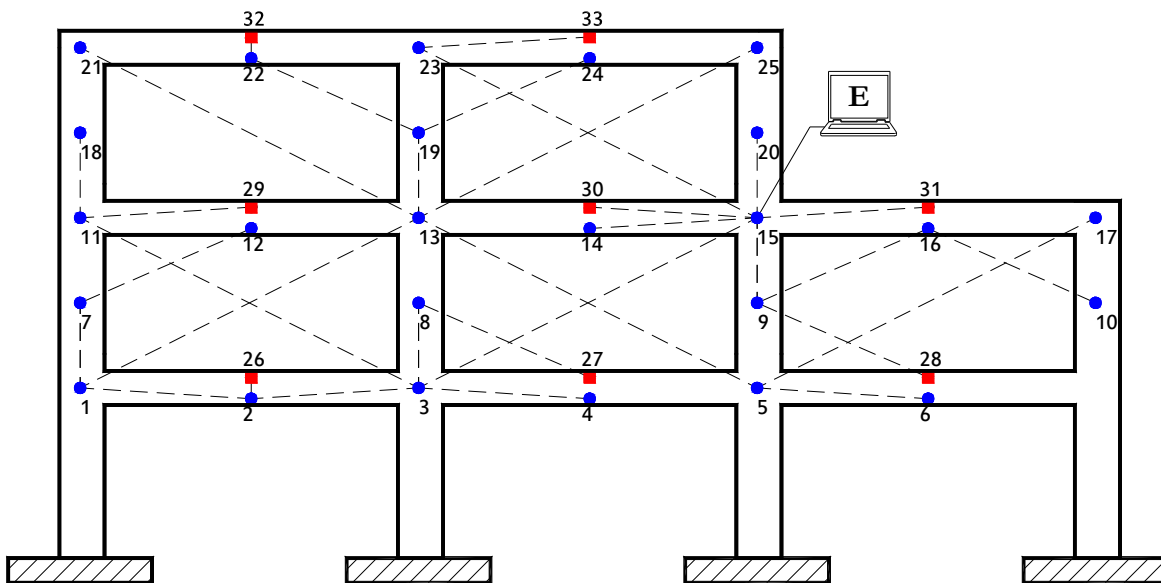


b) Búsqueda en amplitud "PI"

Figura 6.54 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IVD



a) Búsqueda en profundidad “DFS”



b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.55 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-IVE

CAPÍTULO 6. CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

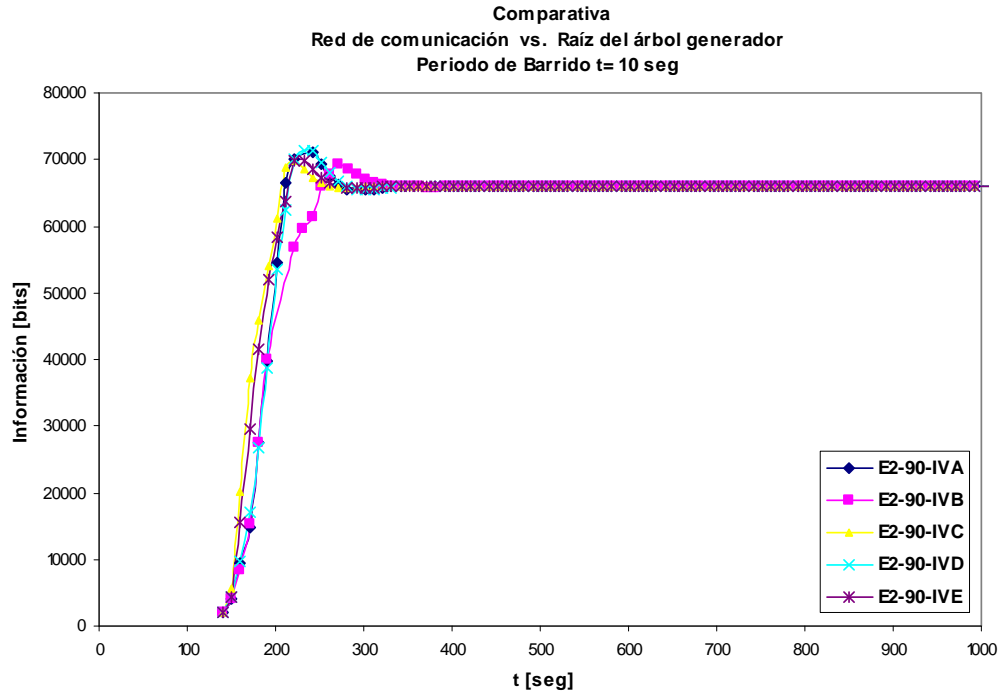


Figura 6.56 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 10$ seg.

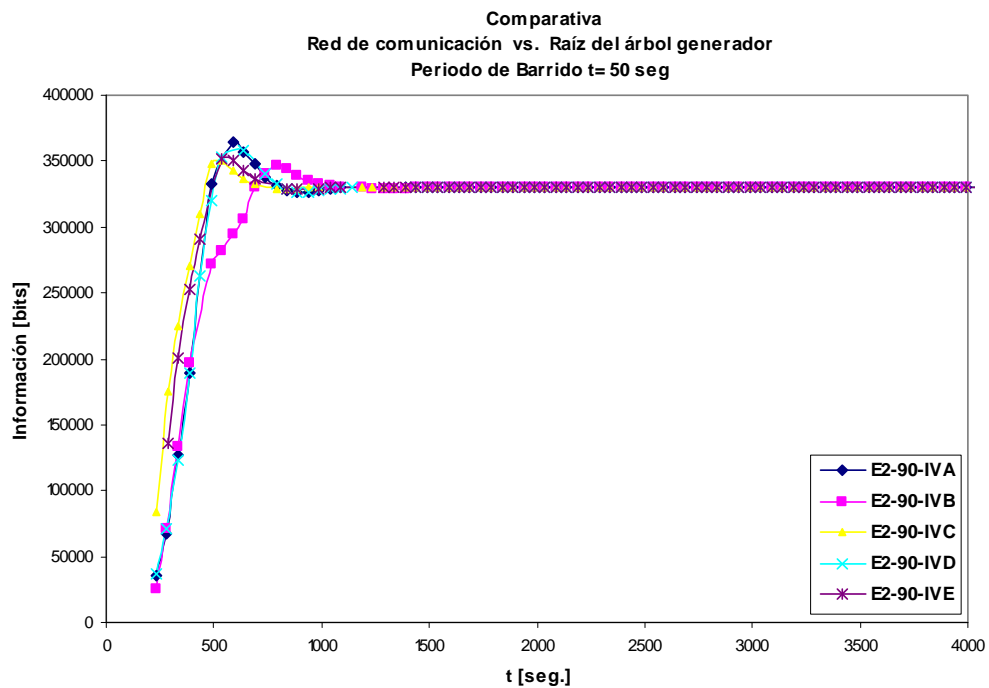


Figura 6.57 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 50$ seg.

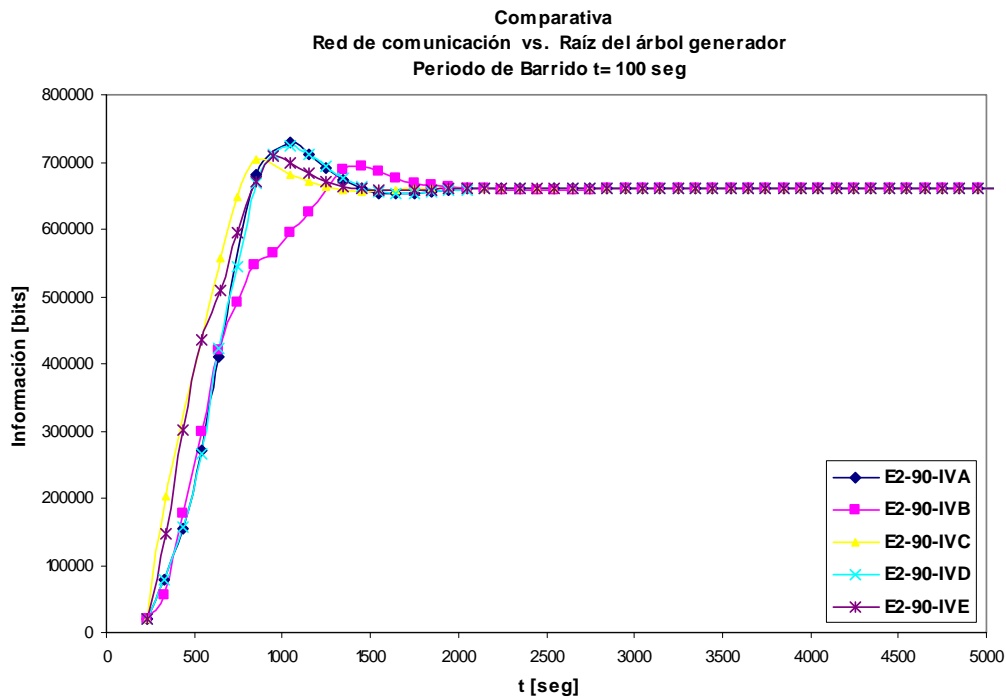


Figura 6.58 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 100$ seg.

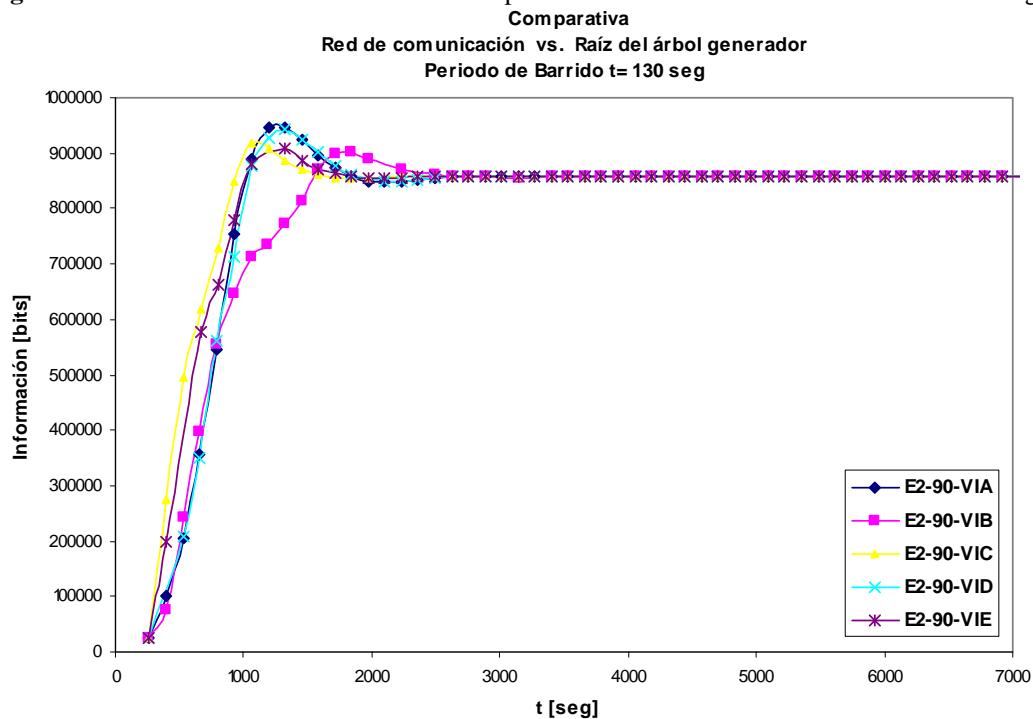


Figura 6.59 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 130$ seg.

CAPÍTULO 6. CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

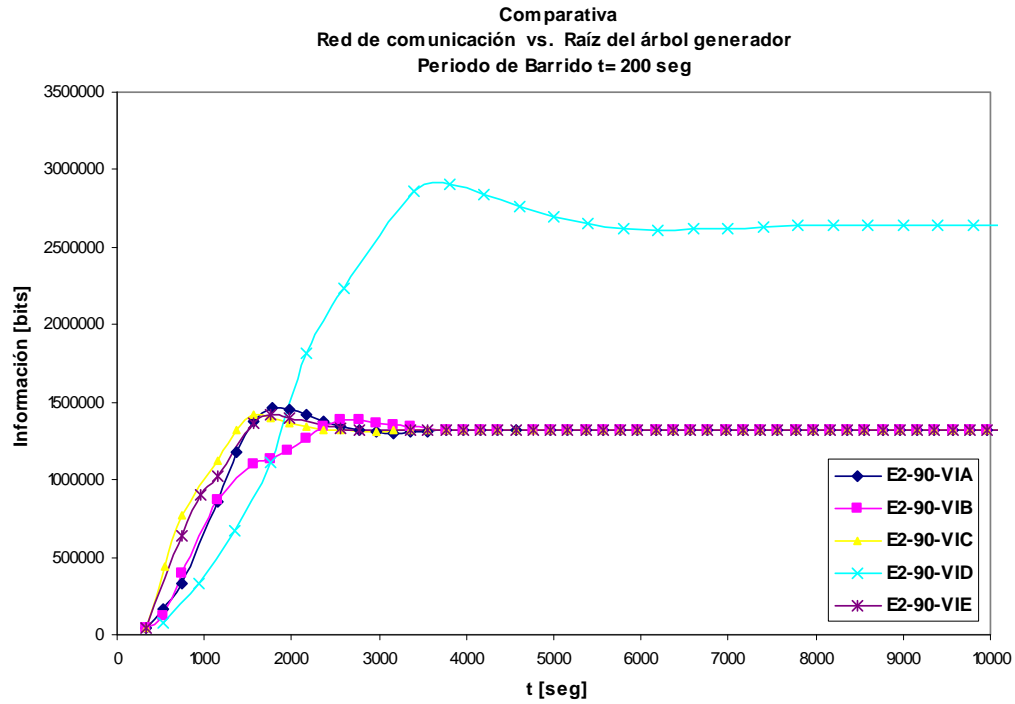


Figura 6.60 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 200$ seg.

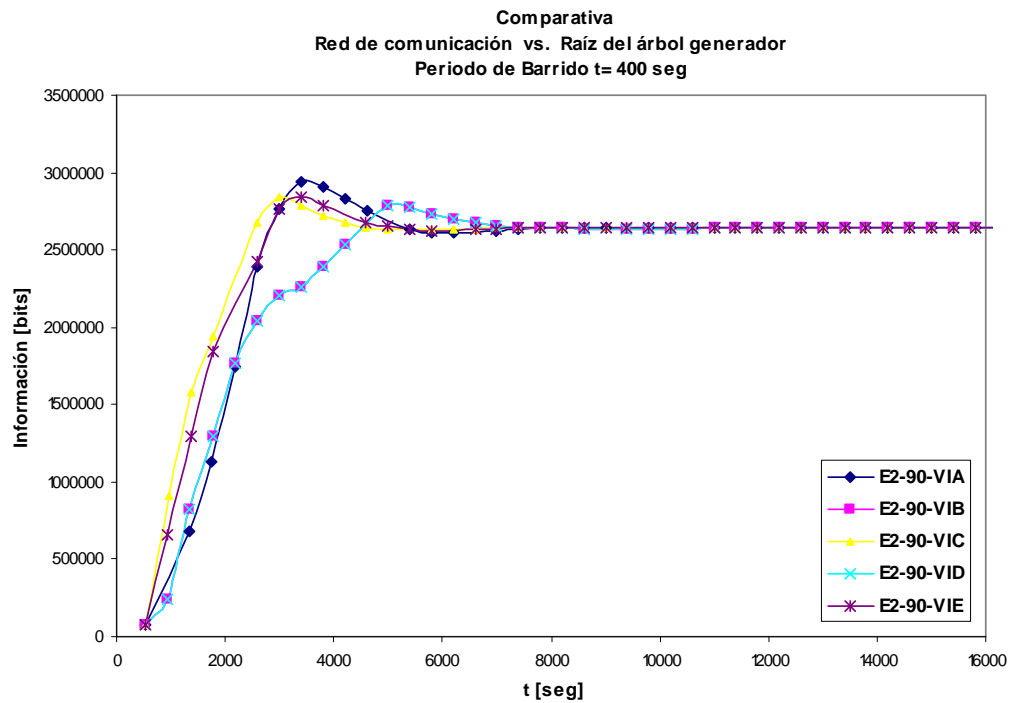
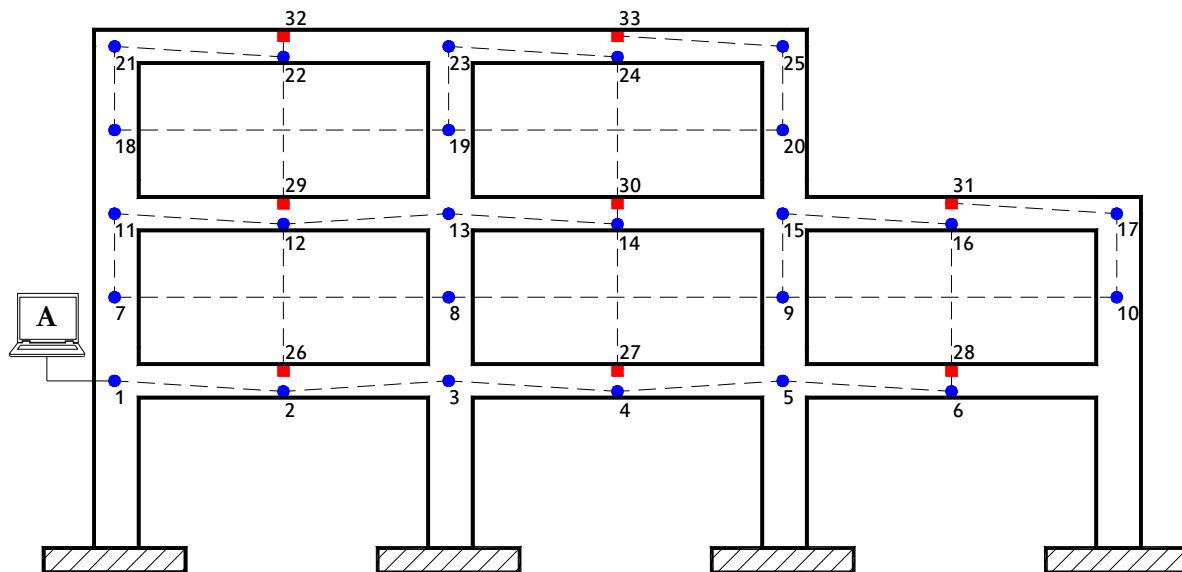
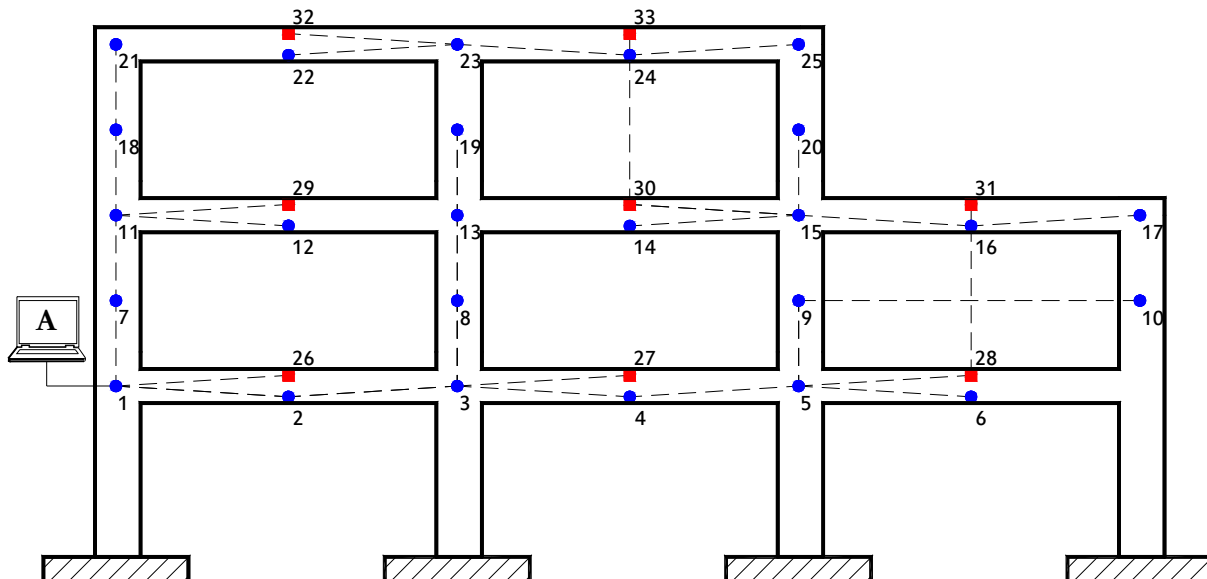


Figura 6.61 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 400$ seg.

VI.8.5 E2-90-VA, E2-90-VB, E2-90-VC, E2-90-VD y E2-90-VE

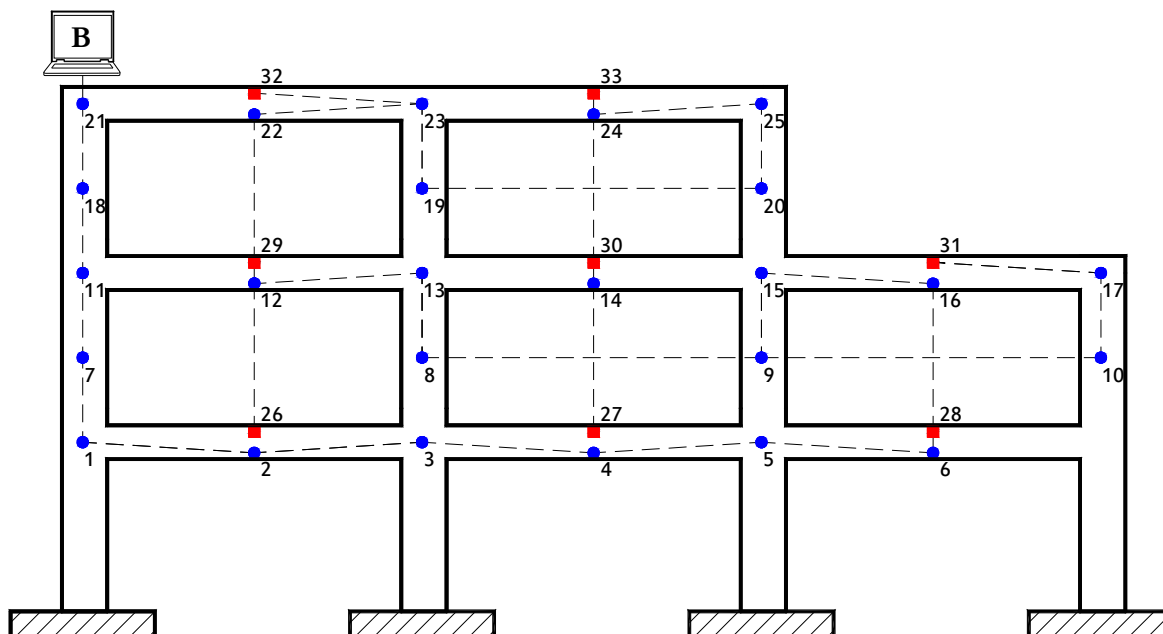


a) Búsqueda en profundidad "DFS"

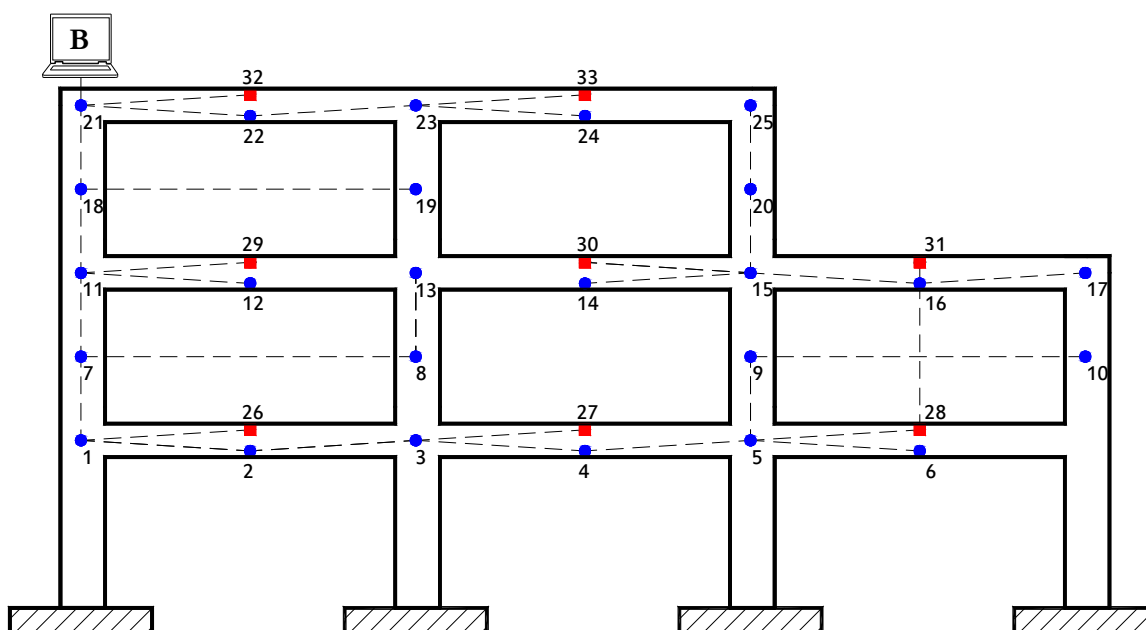


b) Búsqueda en amplitud "PI"

Figura 6.62 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-VA

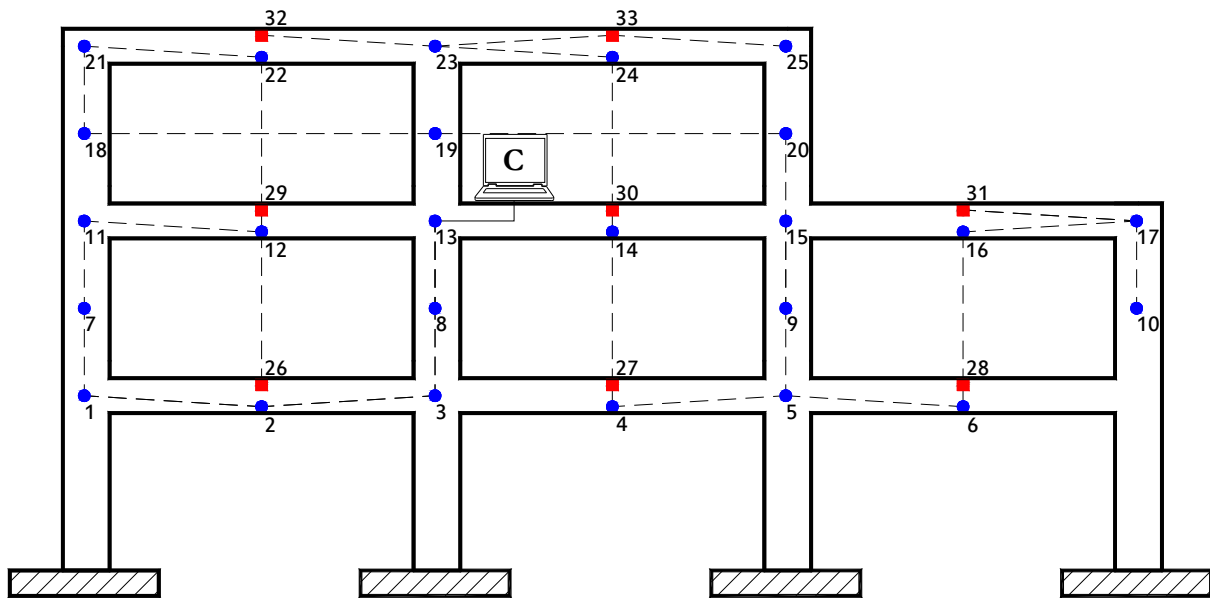


a) Búsqueda en profundidad “DFS”

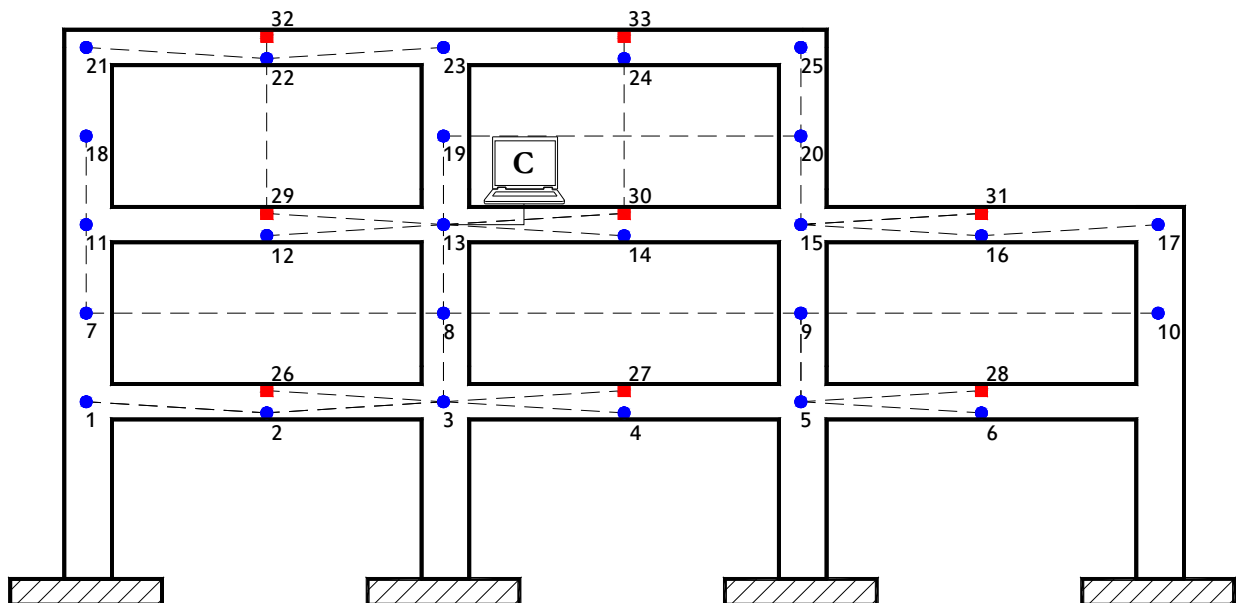


b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.63 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-VB

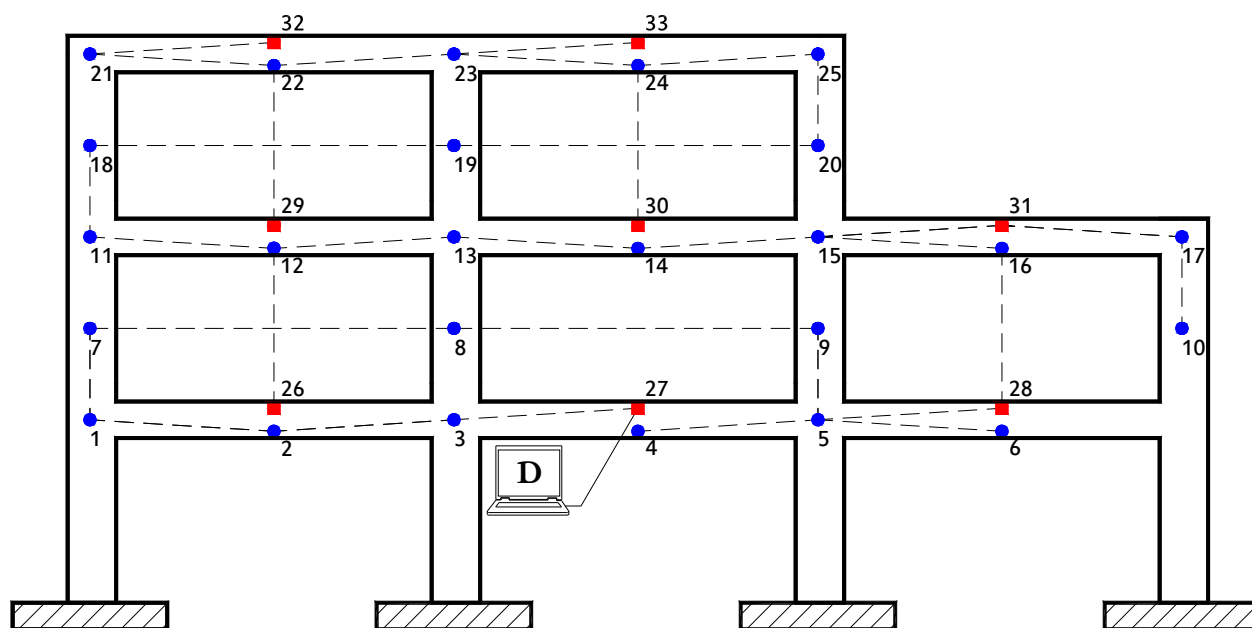


a) Búsqueda en profundidad “DFS”

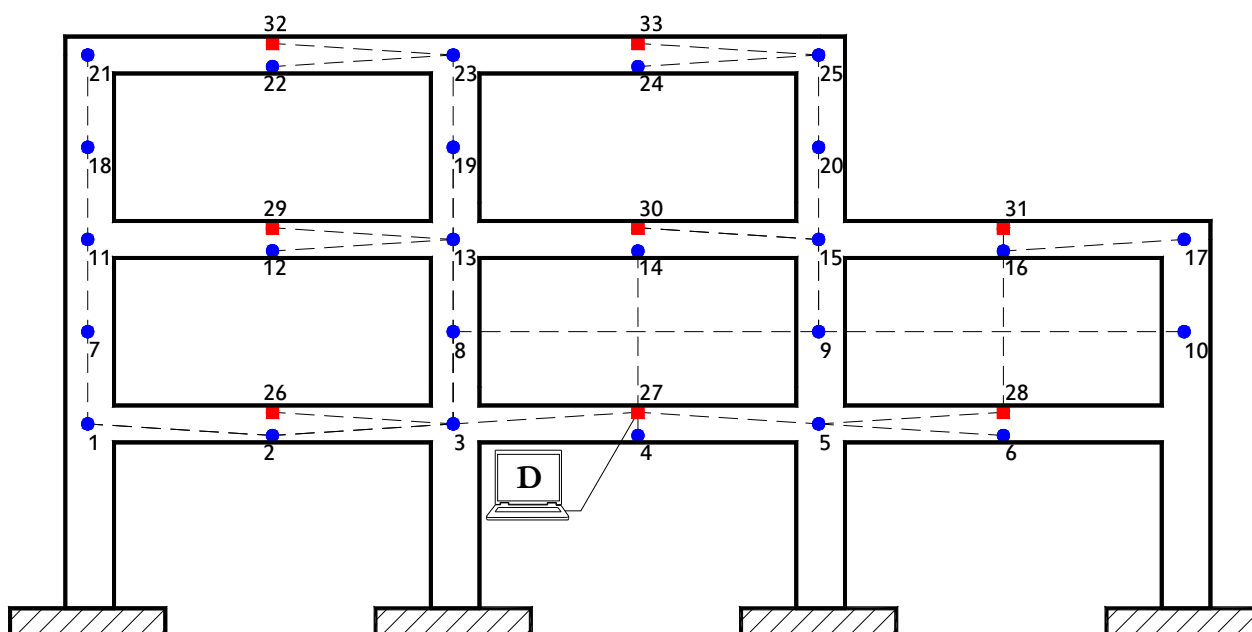


b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.64 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-VC

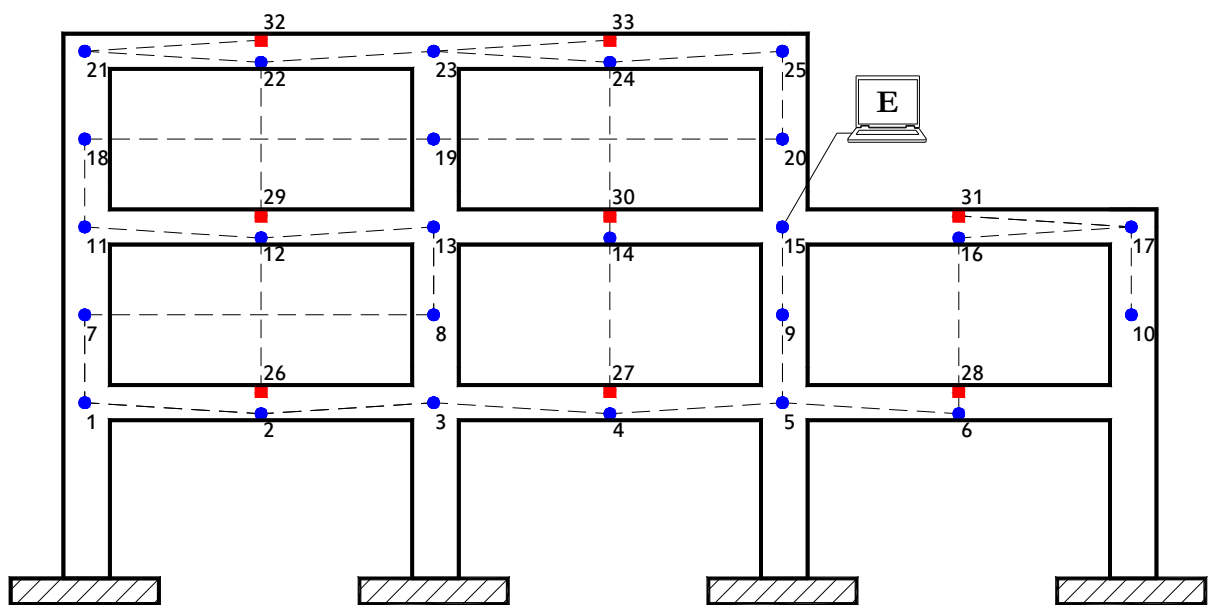


a) Búsqueda en profundidad “DFS”

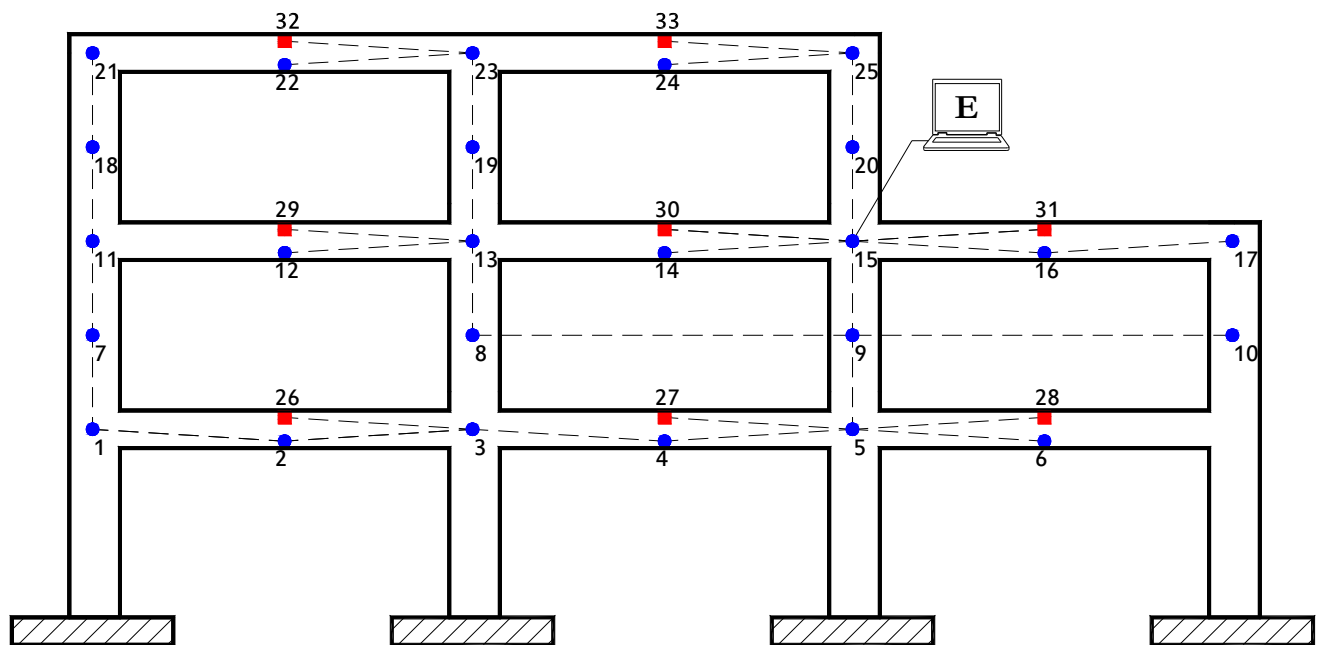


b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.65 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-VD



a) Búsqueda en profundidad “DFS”



b) Búsqueda en amplitud “PI”

Figura 6.66 Árboles generadores construidos durante la simulación en E2-90-VE

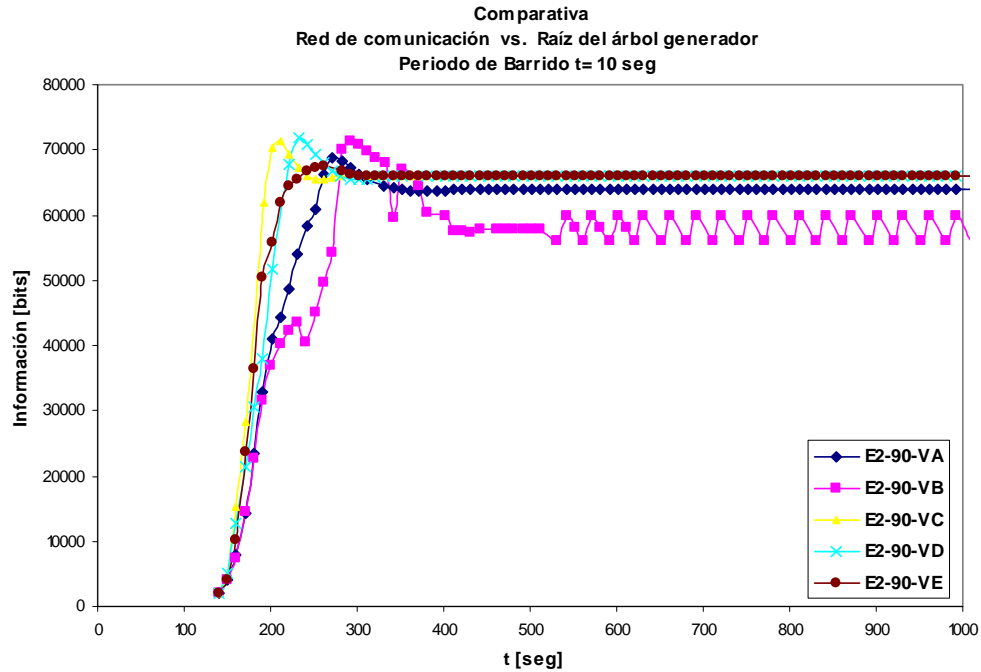


Figura 6.67 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 10$ seg.

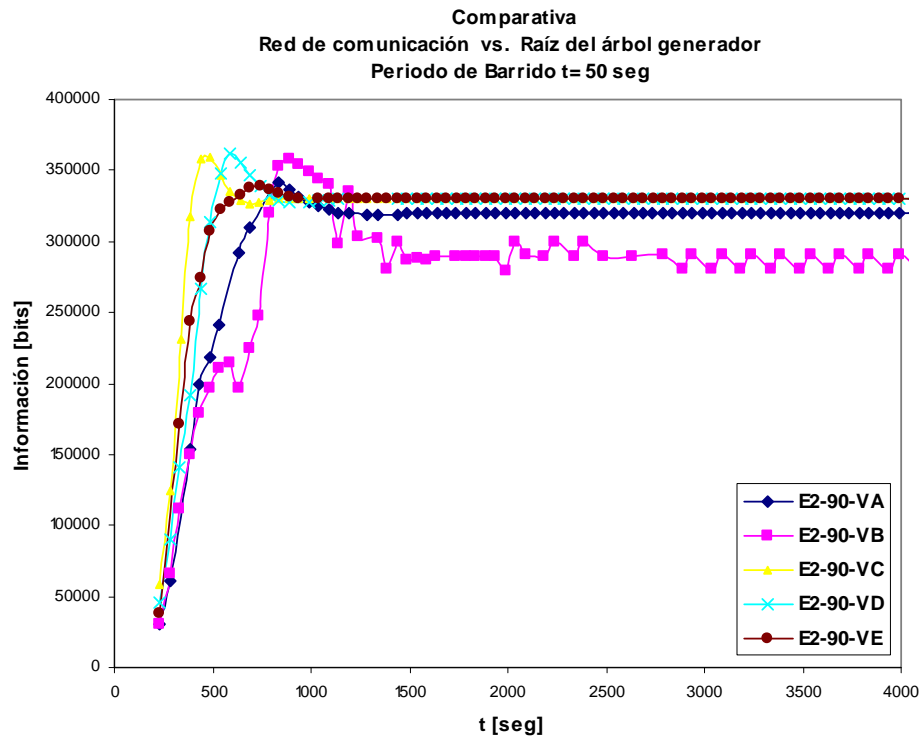


Figura 6.68 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 50$ seg.

CAPÍTULO 6. CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

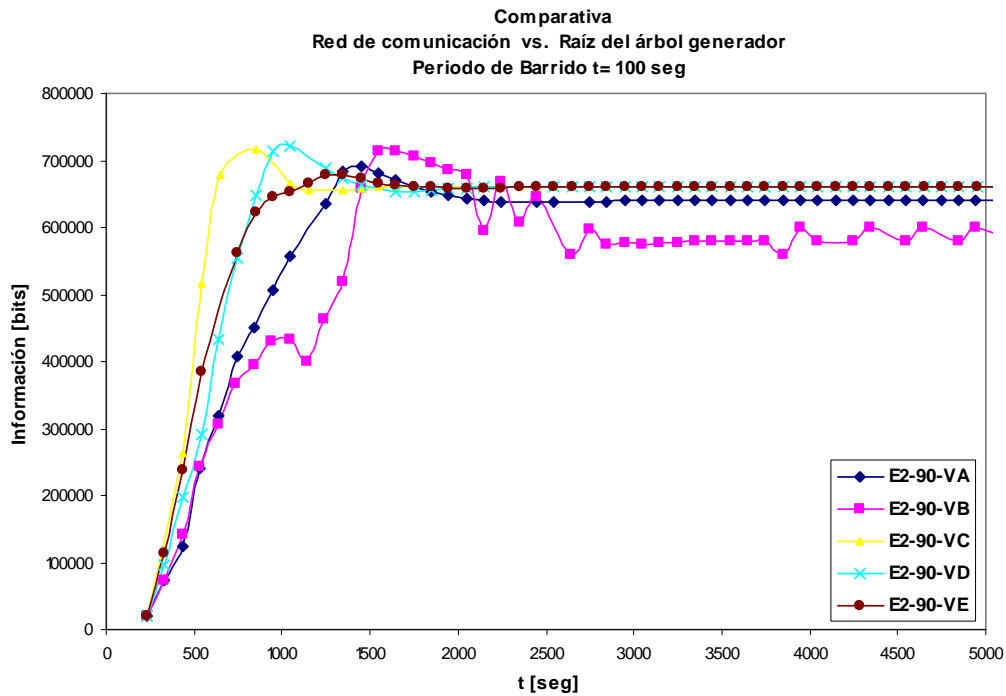


Figura 6.69 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 100$ seg.

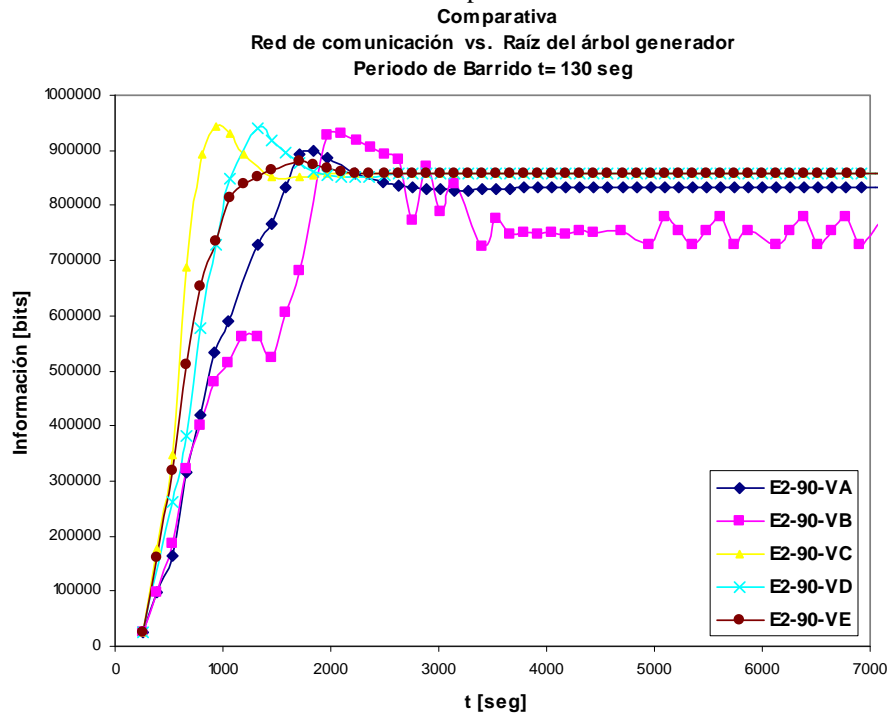


Figura 6.70 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 130$ seg.

CAPÍTULO 6. CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

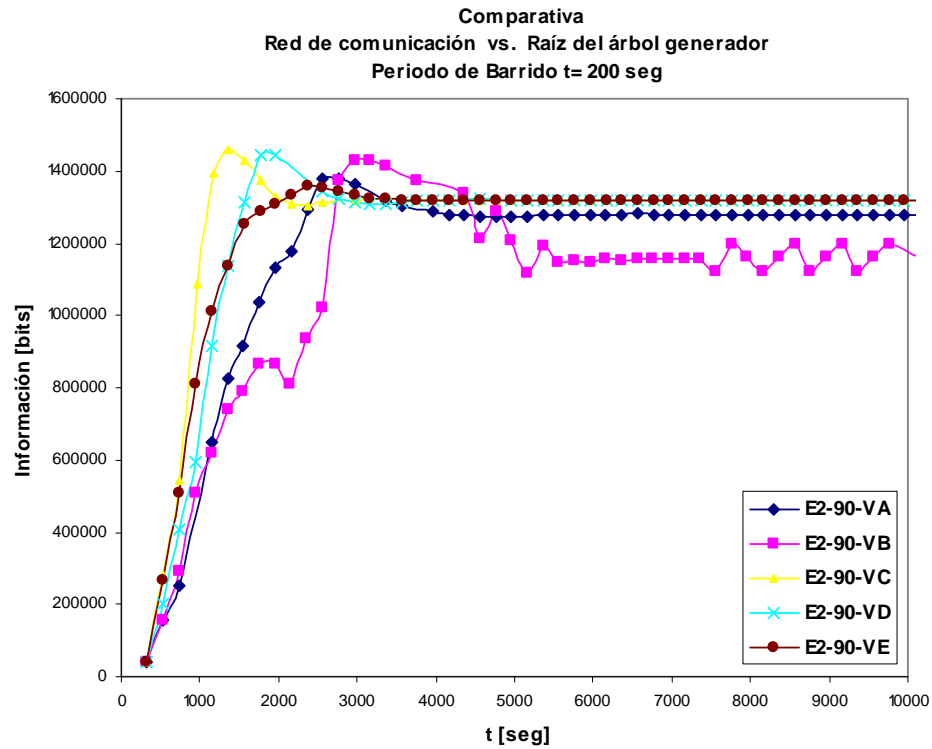


Figura 6.71 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 200$ seg.

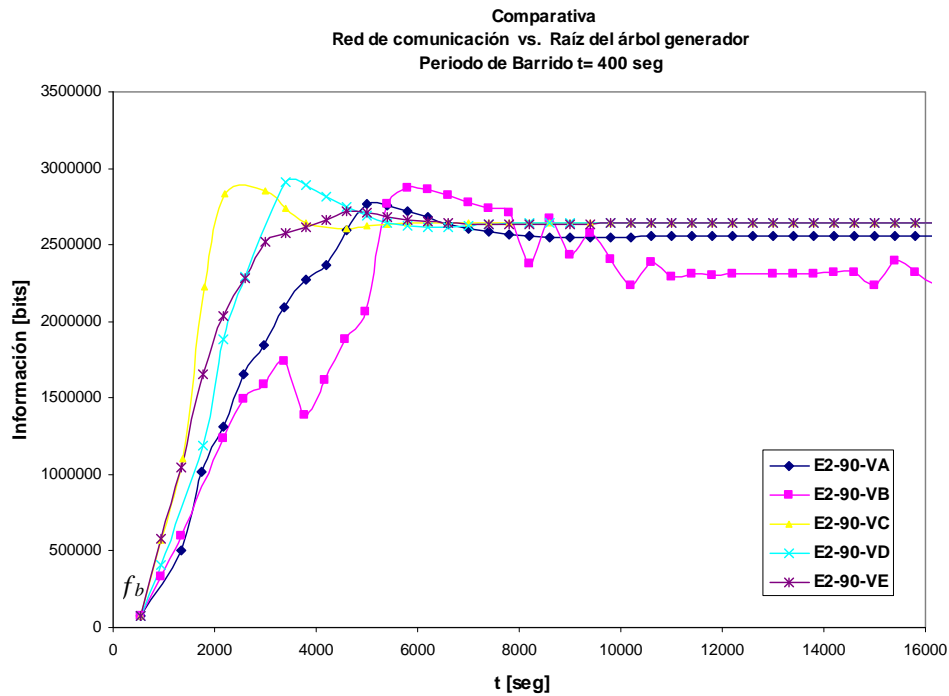
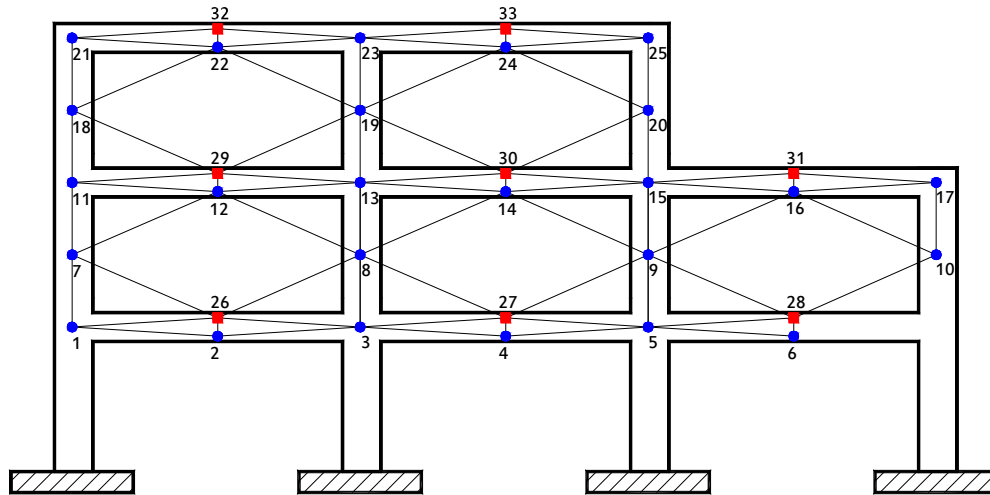


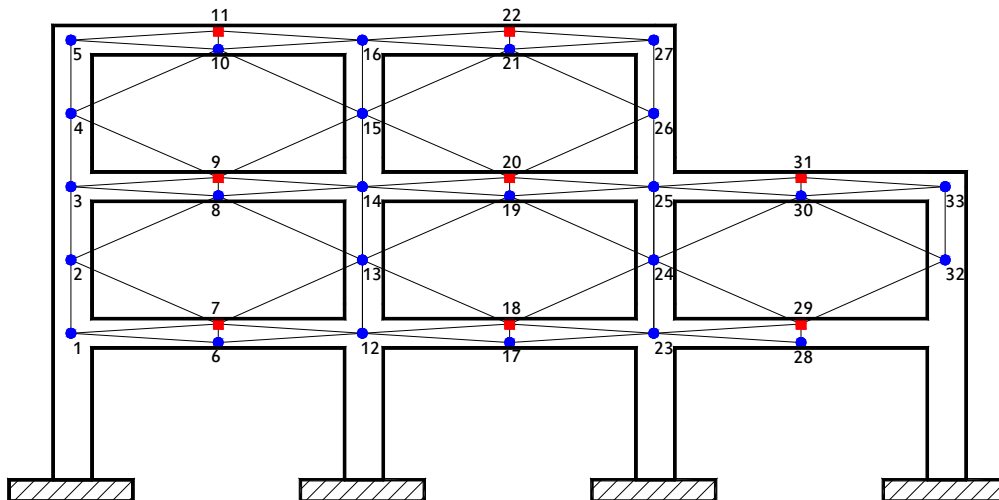
Figura 6.72 Información almacenada en la computadora central durante la simulación $t = 400$ seg.

VI. 9 Caso particular E2-90-III-BIS

En la red de comunicación alterna E2-90-III-BIS, se nombra de una manera diferente a los nodos, con ello se pretende evaluar si esta variable influye en la simulación del sistema, a continuación se presentarán los resultados obtenidos para este caso particular.



a) E2-90-III

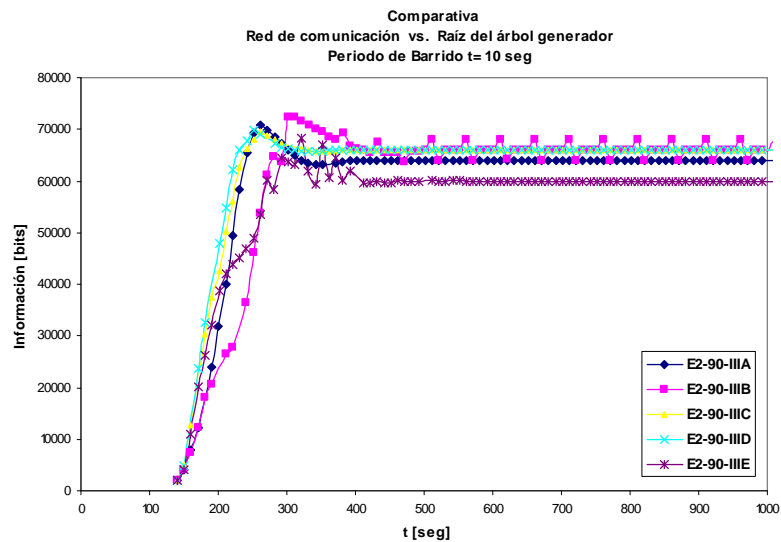


b) E2-90-III -BIS

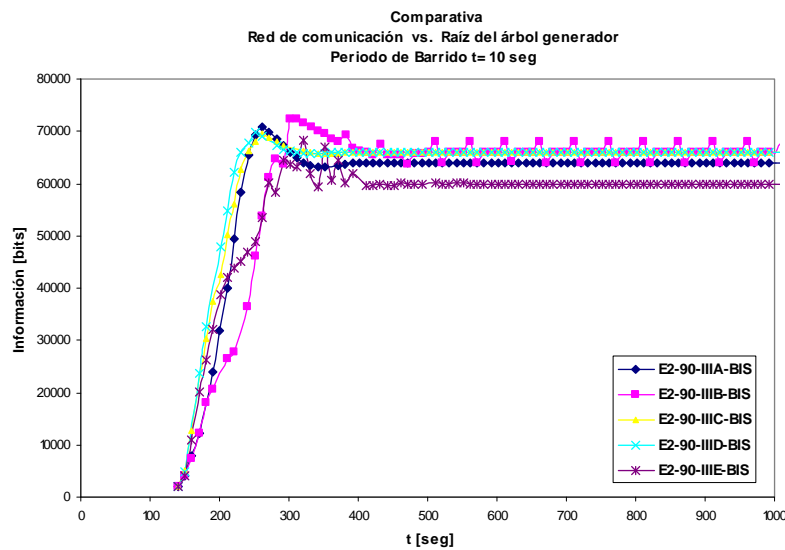
Figura 6.73 Redes de comunicación cotejadas

CAPÍTULO 6. CONECTIVIDAD EN LOS SENSORES Y MANEJO DE LA INFORMACIÓN

En la figura 6.73, se observa que la variable estudiada al nombrar de manera diferente a los nodos que integran la red no afecta en la simulación de la red de sensores inalámbricos.



a) E2-90-III



b) E2-90-III -BIS

Figura 6.74 Comparación de la información almacenada en la computadora central durante la simulaciones $t = 10$ seg.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

A continuación se presentan las metas alcanzadas en este trabajo de investigación. Estas se relacionan con la instrumentación óptima de sistemas estructurales, conectividad de los sensores y manejo de la información en la red. Se espera, que dichas aportaciones sean útiles en la implantación de redes inalámbricas de sensores inteligentes en estructuras de carácter civil.

VII.1 Conclusiones

De los resultados obtenidos al modelar el marco plano “E2” discretizado de cuatro maneras distintas y aplicando la metodología de instrumentación óptima propuesta por Cherng (2003) se concluye lo siguiente:

- La densidad de la instrumentación es proporcional al número de formas modales y periodos fundamentales que deseé monitorear.
- Las formas modales fundamentales de traslación lateral de estructuras construidas mediante marcos planos pueden ser registradas en su totalidad por sensores que registren el desplazamiento horizontal del nodo.
- Los sensores que registran el comportamiento del grado de libertad de rotación sólo contribuyen en el monitoreo de formas modales locales, entendiendo como modos locales los que se construyen en función de los grados de libertad que aportan información sobre la flexibilidad en vigas.
- Los sensores que registran el comportamiento vertical del grado de libertad ayudan en el monitoreo de formas modales combinadas (fundamentales con locales).
- Con la metodología de instrumentación óptima estudiada y habilitada en esta investigación se puede predecir de una manera práctica el número, orientación y localización de los sensores que integraran la red inalámbrica de un sistema estructural.

En la segunda etapa de este trabajo donde se aborda la conectividad de los sensores y el manejo de la información es importante mencionar las siguientes hipótesis:

- El nodo recolector (raíz del árbol), no presenta fallas de paro y dispone de un temporizador con el que mide el tiempo que tarda en completarse un recorrido DFS sobre la gráfica subyacente. Con ello es capaz de decidir cuando se ha interrumpido el recorrido y arranca un procedimiento de contingencia que reinicia los protocolos de sincronía y transporte.
- Por otra parte, el protocolo es escalable debido a que los algoritmos DFS y PIF funcionan para cualquier número de nodos; sin embargo, es muy importante observar que la agregación de la información que se transporta hacia el nodo recolector tiene el potencial de crear cuellos de botella.
- El recorrido de sincronía o barrido, tiene la posibilidad de acelerar el transporte de los datos y, con ello, aliviar el regreso de datos; sin embargo, la velocidad de

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

barrido tiene un límite superior (ver ecuación 6.1.1), determinado por el rango de colisión.

- También suponemos que debajo del protocolo DFS funciona otro protocolo que resuelve los problemas de control de acceso al medio (MAC) y posicionamiento, para los que existen soluciones bien conocidas.

VII.2 Trabajos futuros

Es deseable implantar la metodología de instrumentación óptima a sistemas estructurales idealizados de forma tridimensional. Esto con el propósito de cotejar los resultados obtenidos en este trabajo y establecer parámetros que repercutan en un mejor muestreo de las características dinámicas.

Es necesario implantar la metodología de IISE, a un espécimen construido en el laboratorio con el propósito de estudiar el comportamiento que presenta ante condiciones normales y excitaciones controladas. Una vez que se conozca el comportamiento del espécimen de una manera razonable, debe inducirse daño local en algunos elementos estructurales con la finalidad de encontrar un modelo que basándose en los registros recolectados (características dinámicas anteriores y posteriores al daño inducido), pueda ubicar el daño (cambio de la rigidez).

Paralelamente se requiere trabajar con otras disciplinas como la ingeniería electrónica e ingeniería en sistemas computacionales con el propósito de construir sensores que satisfagan los requerimientos mínimos de monitoreo de estructura de carácter civil, así como sistemas de recolección y flujo de la información mas eficientes.

El propósito de proyecto global se relaciona con la detección de daño local y general en estructuras de carácter civil, por tal motivo una vez que se tenga calibrada una red de sensores inalámbricos en un espécimen de laboratorio (marco a escala), se puede proceder a la implantación en una estructura real para estudiar su comportamiento dinámico, posible daño local o global, comportamiento ante excitaciones accidentales, etc.

Bibliografía

1. Alcántara, A., D. Muriá, R. Vázquez, M. A. Macías, D. Almora, M. Torres, J. Velasco, G. Castro, M. Ayala y H. Sandoval. (2004), “Instrumentación sísmica de un edificio de telecomunicaciones” Memorias del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero.
2. Cherng, A.-P. (2003), “Optimal sensor placement for modal parameter identification using signal subspace correlation techniques” *Mechanical systems and signal processing*. Vol. 7(2). pp 361-378.
3. Cheung, T. (1983) “Graph traversal techniques and the maximum flow problem in distributed computation”. *IEEE Trans. in Software Engineering*, SE-9(4):504-512.
4. Cidon, I. (1988), “Yet another distributed depth-first-search algorithm”. *Information Processing Letters*, 26:301-305.
5. Frodigh, M., P. Johansson y P. Larsson. (2000), “Formación de redes inalámbricas ad hoc-El arte de la formación de redes sin red” *Ericsson Review*, No. 4, pp 248-263.
6. Heredia, E. (1996). “Optimal instrumentation of structural systems” *Memorias 11th. World conf. on earthquake engineering*, Acapulco, México.
7. Heredia, E., R. M. Iturrizaga y L. Esteva. (1999), “Optimal instrumentation of structures on flexible base for system identification” *Earthquake Engng. and Struct. Dyn.* Vol 28, pp 1471-1482.
8. Herliih, M. (1988), “Impossibility and universality results for wait-free synchronization”. En 7th *ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*, pp 276-29, New York.
9. Lamport, L. y N. Lynch.(1990), “Distributed computing: Models and methods”. En J. Van Leeuwen, editor, **Handbook of Theoretical Computer Science**, Vol. B, Capítulo 18, pp 1158-119. Elsevier and MIT Press.
10. Lynch, N. (1996), **Distributed Algorithms**, Morgan Kaufmann publishers.
11. Marcelín, R. (2004). “Notas para un curso de algoritmos distribuidos”. CINVESTAV-México. *Departamento de Ingeniería Electrónica*. Octubre del 2004.

BIBLIOGRAFÍA

12. Marcelín, R. (2006), “Locally-Constructed trees for ad hoc routing”, *LNCS*, pp 194-204.
13. MATLAB (2006). “The language of Technical Computing”, © 1994-2006 The MathWorks, Inc.
14. Meli, R., D. Rivera, R. Sánchez y E. Miranda. (2001), “Instrumentación sísmica de la catedral metropolitana resultados 1997-2000” *Revista de Ingeniería Sísmica*. No.65 pp 17-48.
15. Muriá, D. y Meli R. (1994). “Respuesta sísmica de un edificio alto instrumentado en la ciudad de México” *XIV Congreso de Ingeniería Estructural*, Acapulco Gro. pp. 415-420
16. Muriá, D. y R. González. (1995). “Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México”. *Revista de Ingeniería Sísmica*. No.51 pp 25-45.
17. NTC-Concreto (2004). “Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructura de Concreto”, *Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal*. pp 14-15
18. Ruiz-Sandoval, H. M., T. Nagayama, B. Spencer y N. Kurata. (2004) “Implementación de un acelerómetro de alta sensibilidad para la plataforma MICA”, *XIV Congreso de Ingeniería Estructural*, Acapulco Gro.
19. Schneider, B. F. (1993) “**What good are models and what models are good?**”. En S. Mullender, editor, **Distributed Systems**, capítulo 2, pp 17-26. ACM, Segunda edición.
20. Segall, A. (1983), “**Distributed network protocols**”. *IEEE Trans. on Information Theory*, 29(1):23-35.
21. Shah, P. C. y F. E. Udwardia. (1978). “A methodology for optimal sensor locations for Identification of dynamic systems”, *Journal Appl. Mech.*, Vol 45. pp 188-196.
22. Udwardia, F. E. (1994). “Methodology for optimum sensor locations for parameter identification in dynamic systems”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol 120, pp 368-390.
23. Yuen, K.-V., C. Papadimitriou y N. C. Mickleborough. (2001). “Optimal sensor placement methodology for identification with unmeasured excitation” *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control* , ASME, Vol. 123, pp 667-686.

Apéndice A

INSTRUMENTACIÓN DEL MARCO E2-90

Se presenta en forma detallada los procesos previos a la aplicación de la metodología propuesta por Cherng (2003), así como los resultados obtenidos de dicha metodología para el marco E2-90.

A.1 Estructuración y propiedades de los elementos estructurales

Como primer objetivo se tiene que reconocer el tipo de elementos que conforman a la estructura. En el caso del marco E2 los elementos que lo integran son vigas y columnas dichos elementos se pueden modelar como se muestra en la figura A.1. Donde para cada fuerza o desplazamiento en los extremos de la barra se puede colocar un sensor (figura A.1b).

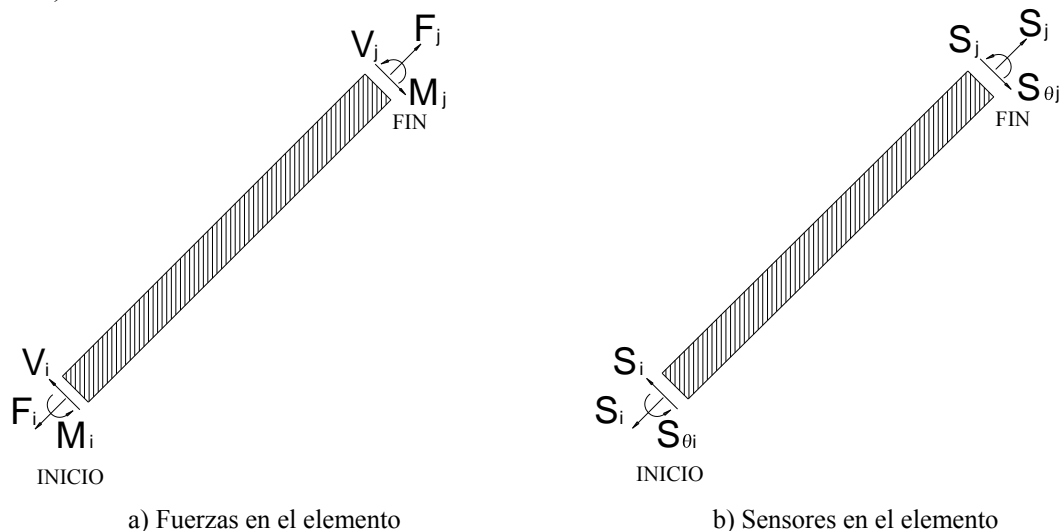


Figura A.1 Analogías entre fuerzas y sensores

El marco E2-90 se discretiza mediante una serie de barras unidas por nodos que transmiten los desplazamientos de una barra a la otra (figura A.2). Esta integrado por 38 barras, cuatro apoyos (empotramientos perfectos) y 30 nodos.

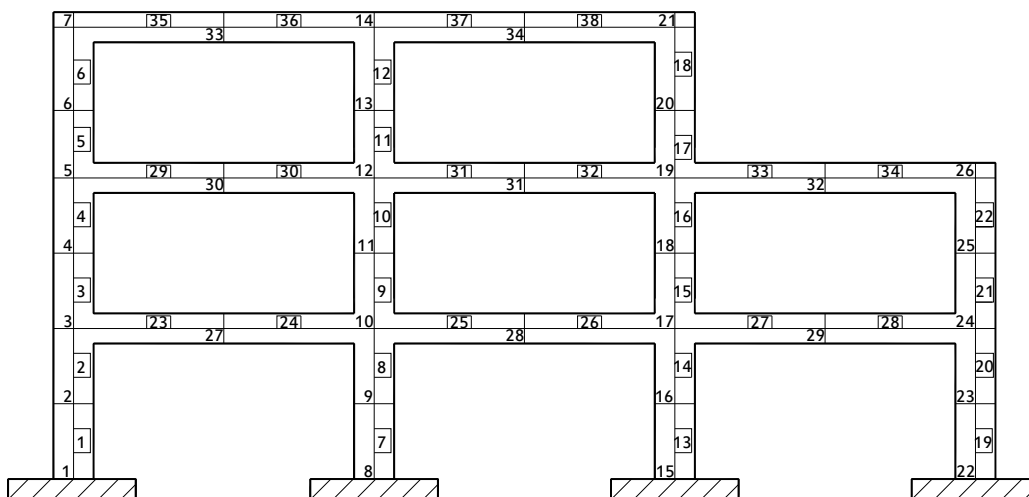


Figura A.2 Discretización del marco E2-90

A.2 Propiedades intrínsecas de la estructura

El marco E2-90 se idealizada como una Sistema de Múltiples Grados de Libertad (SMGL), para ser explícitos, un sistema de noventa grados de libertad de lo cual se obtiene el dígito 90 utilizado en la nomenclatura.

Al estudiar el comportamiento de SMGL en vibración libre se introducen los conceptos de frecuencias naturales y modos de vibración. Estos se determinan mediante la solución numérica del problema de eigenvectores y eigenvalores, o vectores y valores característicos.

La ecuación de movimiento de un SMGL en vibración libre sin amortiguamiento puede expresarse mediante la ecuación A.1.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (\text{A.1})$$

donde:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & m_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{Matriz de Masa (nxn)} \quad (\text{A.2})$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & 0 \\ k_{21} & k_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{Matriz de Rigidez (nxn)} \quad (\text{A.3})$$

$$\{\ddot{u}\} = \frac{d^2 u}{dt^2} \quad \text{Vector de aceleración (nx1)} \quad (\text{A.4})$$

$$\{u\} \quad \text{Vector de desplazamiento (nx1)} \quad (\text{A.5})$$

$$\{0\} \quad \text{Vector cero (nx1)} \quad (\text{A.6})$$

APÉNDICE A. INSTRUMENTACIÓN DEL MARCO E2-90

La ecuación A.1 representa un sistema de n ecuaciones diferenciales homogéneas acopladas a través de las matrices de masa y rigidez. Donde n representa el número de grados de libertad.

La problemática de vibración libre consiste en determinar las condiciones bajo las cuales la ecuación A.1, permita la ocurrencia del movimiento. El movimiento en vibración libre de un SMGL puede considerarse como una armónica simple, definida mediante:

$$u_i = \phi_i \text{sen}(\omega t - \alpha), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{A.7})$$

de una forma vectorial

$$\{u\} = \{\phi_n\} \text{sen}(\omega t - \alpha) \quad (\text{A.8})$$

donde ϕ_i , es la amplitud del movimiento de la coordenada i , α es el ángulo de fase, n es el número de grados de libertad y ω es la frecuencia circular del sistema. Sustituyendo la ecuación A.8 en la ecuación A.1, tenemos:

$$-\omega^2 [M] \{\phi_n\} \text{sen}(\omega t - \alpha) + [K] \{\phi_n\} \text{sen}(\omega t - \alpha) = \{0\},$$

agrupando términos

$$[[K] - \omega^2 [M]] \{\phi_n\} = \{0\} \quad (\text{A.9})$$

La ecuación A.9 es el caso general de un sistema algebraico de n ecuaciones lineales homogéneas (segundo miembro igual a cero) con n incógnitas, amplitudes, ϕ_n , además de un parámetro por encontrar, ω^2 . La formulación de la ecuación A.9 se conoce como problema característico. Su solución es no trivial, esto es, la solución en la cual no todos los valores de $\phi_n = 0$, requiere que el determinante de la matriz del factor $\{\phi_n\}$ sea igual a cero, por lo tanto,

$$[[K] - \omega_n^2 [M]] = 0 \quad \text{Ecuación Característica} \quad (\text{A.10})$$

Debido a que $[M]$ y $[K]$ son conocidas, la solución radica en obtener el escalar ω_n^2 y el vector $\{\phi_n\}$. En términos generales la ecuación A.10, es una ecuación algebraica de grado n de la incógnita ω^2 , la cual se satisface para n valores de ω^2 . Para cada valor de ω^2 que satisface la ecuación A.10, podemos resolver la ecuación A.9 para $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$, en términos de una constante de proporcionalidad arbitraria.

Las raíces de la ecuación característica se conocen como vector de frecuencias o eigen valores.

$$\omega^2 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \dots \\ \omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Una vez obtenido el vector de frecuencia se sustituye en la ecuación A.9 y se resuelve ésta para el valor correspondiente al vector $\{\phi_n\}$. Los eigen valores no fijan la amplitud del vector $\{\phi_n\}$, sólo muestran la forma del vector mediante valores relativos de los n desplazamientos de ϕ_{nj} , ($j = 1, 2, \dots, n$). Con esto obtenemos, para un sistema de n grados de libertad, n vectores independientes $\{\phi_n\}$, conocidos como modos naturales de vibración o formas modales.

Para marco E2-90 se obtiene la matriz de masa y rigidez ($M_{90 \times 90}$ y $K_{90 \times 90}$).

$$M_{E2-90} = \begin{bmatrix} 2153 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2153 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1211 \end{bmatrix} \left(\frac{\text{Nseg}^2}{\text{m}} \right) \quad (\text{A.12})$$

$$K_{E2-90} = \begin{bmatrix} 5339 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 18773 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 422.4 \end{bmatrix} \left(\frac{\text{MN}}{\text{m}} \right) \quad (\text{A.13})$$

A.3 Parámetros dinámicos

Con las matrices A.12 y A.13, se resuelve la ecuación característica (ecuación A.10) con ello se pueden obtener las raíces de las ecuaciones cuadráticas representadas en el escalar ω_n^2 (ω_{90}).

$$\omega_{E2-90}^2 = \begin{bmatrix} 1075 \\ \dots \\ \dots \\ 11099224.6 \end{bmatrix} \left(\left(\frac{\text{Rad}}{\text{seg}} \right)^2 \right) \quad (\text{A.14})$$

$$\omega_{E2-90} = \begin{bmatrix} 32.78 \\ \dots \\ \dots \\ 3331.54 \end{bmatrix} \left(\frac{\text{Rad}}{\text{seg}} \right) \quad (\text{A.15})$$

$$T_{E2-90} = \begin{bmatrix} 0.192 \\ \dots \\ \dots \\ 0.002 \end{bmatrix} (\text{seg}) \quad (\text{A.16})$$

Si sustituimos el vector A.14 en la ecuación A.9 podemos obtener ϕ_{nj} , ($j = 1, 2, \dots, n$), ($\phi_{90 \times 90}$).

$$\phi_{E2-90} = \begin{bmatrix} -0.0314 & -0.0881 & \dots & 0.0002 \\ -0.0008 & 0.0013 & \dots & 0.4947 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -0.0208 & 0.1044 & \dots & 0.0000 \end{bmatrix}$$

A.4 Instrumentación óptima de la estructura

Una vez obtenidas las formas modales se aplica la metodología de Cherng (2003), la cual establece la normalización de cada uno de los modos de tal forma que las metodologías LG y BHM, puedan ser empleadas de igual manera antes de la clasificación.

Al normalizar la contribución del i-ésimo sensor a la r-ésima forma modal, se define la relación de los valores singulares correspondientes a las formas modales, ecuaciones A.17 y A.18.

$$\rho_{ir} = \frac{\sigma_{ir}^2}{\sigma_r^2} = \frac{\varphi_{ir}^2}{\sum_{i=1}^m \varphi_{ir}^2} = \frac{\varphi_{ir}^2}{\|\varphi_r\|^2} = \frac{\bar{\sigma}_{ir}^2}{\bar{\sigma}_r^2} = \bar{\rho}_{ir}, \quad 0 \leq \rho_{ir}, \quad \bar{\rho}_{ir} \leq 1 \quad (\text{A.17})$$

donde:

$$\sum_{i=1}^m \rho_{ir} = 1 \quad \forall_r \quad (\text{A.18})$$

Por tal motivo, cada modo aporta la misma contribución (igual a la unidad), además el total de las distribuciones de los sensores esta representada en n . Debe de tomarse en cuenta que la contribución de los sensores es transformada de valores singulares a formas modales, esto sin perder validez.

$$\rho_{90 \times 90} = \begin{matrix} & \text{MODO 1} & \text{MODO 2} & \text{MODO 3} & \dots & \text{MODO 88} & \text{MODO 89} & \text{MODO 90} \\ \begin{bmatrix} 0.00044 & 0.00338 & 0.00026 & \dots & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & \dots & 0.00000 & 0.00000 & 0.06768 \\ 0.00065 & 0.00403 & 0.00024 & \dots & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0.08756 & 0.07185 & 0.00116 & \dots & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00001 & 0.00110 & 0.02900 & \dots & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00019 & 0.00475 & 0.00014 & \dots & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \end{bmatrix} & \begin{matrix} S_{X_1} \\ S_{Y_2} \\ M_{\theta_3} \\ \dots \\ S_{X_88} \\ S_{Y_89} \\ M_{\theta_90} \end{matrix} \end{matrix}$$

donde:

$$\sum_{i=1}^{90} \rho_{90,1} = 1, \quad \sum_{i=1}^{90} \rho_{90,2} = 1, \quad \sum_{i=1}^{90} \rho_{90,3} = 1, \dots, \sum_{i=1}^{90} \rho_{90,88} = 1, \quad \sum_{i=1}^{90} \rho_{90,89} = 1 \quad \sum_{i=1}^{90} \rho_{90,90} = 1$$

En el marco E2-90 se estudia la cantidad de sensores óptima en el monitoreo de las primeras cinco formas modales, debido a que dadas las características de la estructura éstas representan el comportamiento dinámico de una manera adecuada.

Con el propósito de descartar de la instrumentación los sensores que aportan un porcentaje bajo de información, además de criterios de disponibilidad y uso de sensores en la actualidad, se fijan los siguientes parámetros.

- a. Se eliminan del arreglo final aquellos sensores S_X y S_Y , en los que se cumpla.
 $\rho_{ir} < 0.00001$ (A.19)

evaluando la ecuación A.19, por separado en cada una de las cinco formas modales.

APÉNDICE A. INSTRUMENTACIÓN DEL MARCO E2-90

- b. Se eliminan del arreglo final todos los sensores M_0 , debido a que a pesar de estar disponibles en el mercado son poco utilizados.

Aplicando estas restricciones se obtiene la matriz A20, la cual muestra los sensores que deben de ser colocados en la estructura.

	MODO1	MODO2	MODO3	MODO4	MODO5	GL	
$\rho =$	0.0047	0.0222	0.0008	0.0017	0.0000	4	(A20)
	0.0166	0.0308	0.0004	0.0042	0.0000	7	
	0.0364	0.0118	0.0004	0.0003	0.0000	10	
	0.0609	0.0035	0.0001	0.0015	0.0004	13	
	0.0878	0.0707	0.0016	0.0021	0.0000	16	
	0.0048	0.0240	0.0017	0.0006	0.0000	22	
	0.0167	0.0339	0.0045	0.0001	0.0001	25	
	0.0364	0.0144	0.0002	0.0002	0.0001	28	
	0.0612	0.0035	0.0022	0.0007	0.0007	31	
	0.0874	0.0708	0.0015	0.0011	0.0000	34	
	0.0048	0.0233	0.0007	0.0012	0.0000	40	
	0.0165	0.0393	0.0003	0.0007	0.0003	43	
	0.0356	0.0214	0.0001	0.0001	0.0001	46	
	0.0593	0.0010	0.0011	0.0000	0.0002	49	
	0.0872	0.0683	0.0007	0.0009	0.0000	52	
	0.0162	0.0274	0.0055	0.0042	0.0001	61	
	0.0346	0.0319	0.0000	0.0001	0.0000	64	
	0.0048	0.0241	0.0013	0.0011	0.0000	67	
	0.0000	0.0000	0.0274	0.0886	0.1677	68	
	0.0048	0.0247	0.0012	0.0009	0.0000	70	
	0.0000	0.0002	0.0871	0.0303	0.3130	71	
	0.0048	0.0211	0.0017	0.0021	0.0000	73	
	0.0000	0.0002	0.0538	0.0009	0.2376	74	
	0.0365	0.0136	0.0003	0.0003	0.0000	76	
	0.0000	0.0000	0.0805	0.3519	0.1706	77	
	0.0361	0.0185	0.0002	0.0002	0.0000	79	
	0.0000	0.0001	0.2011	0.0867	0.0547	80	
	0.0353	0.0276	0.0000	0.0000	0.0000	82	
	0.0000	0.0241	0.4409	0.3727	0.0229	83	
	0.0879	0.0731	0.0016	0.0016	0.0000	85	
	0.0000	0.0002	0.0164	0.0092	0.0061	86	
	0.0876	0.0719	0.0012	0.0011	0.0000	88	
	0.0000	0.0011	0.0290	0.0029	0.0146	89	
$\Sigma\rho =$	0.96	0.80	0.97	0.97	0.99		

En la figura A2 se muestra de una forma gráfica el arreglo y la orientación de los sensores en el marco E2-90.

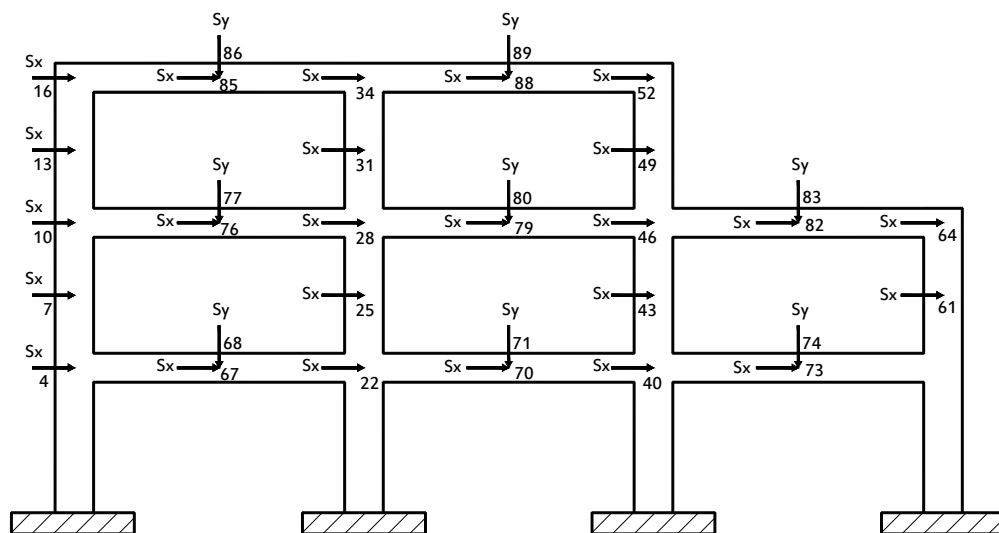


Figura A.3 Arreglo y orientación de los sensores en el marco E2-90

Apéndice B

NOMENCLATURA

APÉNDICE B. NOMENCLATURA

IISE	Instrumentación Inalámbrica en Sistemas Estructurales	
IOSE	Instrumentación Óptima de Sistemas Estructurales	
MIF	Matriz de Información Fisher	
RIS	Redes inalámbricas de sensores	
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency	
FIFO	First In First Out	
PSTA	Protocolo de Sincronía Transporte y Agregación	
MAC	Protocolo de Control de Acceso al Medio	
G = (V, E)	Gráfica no dirigida	
V	Conjunto de nodos	
E	Conjunto de aristas	
BHM	Bayard-Hadaegh-Meldrum	
LG	Lim-Gawronski	
<i>i</i>	Indicador del sensor	(Capítulo 3)
<i>j</i>	$\sqrt{-1}$	(Capítulo 3)
<i>k</i>	Indicador de la operación	(Capítulo 3)
<i>m</i>	Número de sensores candidatos en la localización	
<i>m_s</i>	Número total de sensores deseados en la localización, <i>m_s</i> < <i>m</i>	
<i>n</i>	Número total de formas modales	
<i>p</i>	Número total de excitaciones deseadas	(Capítulo 3)
<i>r</i>	Indicador del modo	
ω	Frecuencia natural	
ζ	Proporción del amortiguamiento viscoso	
σ	Valor singular	
Φ	Matriz modal no normalizada	
ϕ_r	r-ésima forma modal	
ϕ_{ir}	i-ésimo elemento de ϕ_r	
DFS	Depth First Search o (búsqueda en profundidad)	
BFS	Breadth First Search o (búsqueda en amplitud)	
PI	Propagación simple	
S_x	Sensor horizontal	
S_y	Sensor vertical	
M_θ	Sensor rotacional	
N	Número de sensores habilitados en la estructura	
<i>s</i>	Proceso arbitrario	

APÉNDICE B. NOMENCLATURA

<i>i</i>	Indicador del nodo padre	(Capítulo 4)
<i>m</i>	Nodos que conforman la red	(Capítulo 4)
<i>j</i>	Indicador de los hijos de <i>i</i>	(Capítulo 4)
<i>pi</i>	Procesador en el sistema	
<i>c</i>	Sistema	
<i>a</i>	step	
<i>t_i</i>	Inicio la construcción del árbol DFS	
<i>t_{ii}</i>	Termina la construcción del árbol DFS	
<i>t_{iii}</i>	Inicio la construcción del árbol PI	
<i>t_{iv}</i>	Termina la construcción del árbol PI	
<i>I</i>	Tamaño del buffer	
<i>R</i>	Bits generados por el sensor	
<i>P_b</i>	Periodo de barrido	
<i>P_{MAX}</i>	Periodo máxima de barrido para evitar el desborde del buffer	

